FÍSICA 2

OS FUNDAMENTOS DA FÍSICA

RAMALHO • NICOLAU • TOLEDO

Francisco Ramalho Junior

Professor de Física em cursos pré-vestibulares.

Nicolau Gilberto Ferraro

Licenciado em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP). Engenheiro metalurgista pela Escola Politécnica da USP. Professor de Física em cursos pré-vestibulares e em escolas do Ensino Médio e Superior.

Paulo Antônio de Toledo Soares

Médico diplomado pela Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (FMUSP). Professor de Física em cursos pré-vestibulares e em escolas do Ensino Médio.

10ª edição

Moderna PLUS

Coordenação de Projeto e Inovação: Sérgio Quadros, Sandra Homma
Coordenação editorial: Rita Helena Bröckelmann
Edição de texto: Alexandre Braga D'Avila (coordenação), Edna Emiko Nomura, Tomas Masatsugui Hirayama, Erich Gonçalves da Silva, Eugenio Dalle Olle, Horácio Nakazone, Luciana Ribeiro Guimarães, Caio Alencar de Matos
Assistência editorial: Denise Minematsu
Coordenação de *design* e projetos visuais: Sandra Homma
Projeto gráfico e capa: Everson de Paula, Marta Cerqueira Leite
Foto: Sol - © Masterfile/Other Images,
Raio-X do Sol - © Photodisc/Getty Images
Coordenação de produção gráfica: André Monteiro, Maria de Lourdes Rodrigues
Coordenação de revisão: Elaine C. del Nero
Revisão: Márcia da Cruz Nóboa Leme, Nelson José de Camargo
Coordenação de arte: Wilson Gazzoni Agostinho
Edição de arte: Fernanda Fencz, Alexandre de Paula, A+ Comunicação
Ilustrações: Adilson Secco, Nelson Matsuda, Studio Caparroz
Assessoria de projetos visuais: William Hiroshi Taciro
Edição de infografia: Erich Gonçalves da Silva, Alexandre Braga D'Avila, Tomas Masatsugui Hirayama, Eugenio Dalle Olle
Cartografia: Alessandro Passos da Costa
Editoração eletrônica: Grapho Editoração
Coordenação de pesquisa iconográfica: Ana Lucia Soares
Pesquisa iconográfica: Ana Carolina Muniz, Angélica Nakamura, Camila D'Angelo, Carlos Luvizari, Flávia Aline de Morais, Marcia Sato, Thais R. Semprebom, Vera Lucia da Silva Barrionuevo
As imagens identificadas com a sigla CID foram fornecidas pelo Centro de Informação e Documentação da Editora Moderna
Coordenação de *bureau*: Américo Jesus
Tratamento de imagens: Luiz C. Costa, Rubens M. Rodrigues
Pré-impressão: Everton L. de Oliveira, Helio P. de Souza Filho, Marcio H. Kamoto
Coordenação de produção industrial: Wilson Aparecido Troque
Impressão e acabamento:

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Ramalho Junior, Francisco
Os Fundamentos da Física / Francisco Ramalho Junior, Nicolau Gilberto Ferraro, Paulo Antônio de Toledo Soares. — 10. ed. — São Paulo : Moderna, 2009.

Conteúdo: V. 1. Mecânica — V. 2. Termologia, óptica e ondas — V. 3. Eletricidade, introdução à física moderna e análise dimensional.
Bibliografia.

1. Física (Ensino médio) 2. Física (Ensino médio) – Problemas, exercícios etc. I. Ferraro, Nicolau Gilberto. II. Soares, Paulo Antônio de Toledo. III. Título.

09-07089 CDD-530.7

Índices para catálogo sistemático:
1. Física : Estudo e ensino 530.7

ISBN 978-85-16-06336-8 (LA)
ISBN 978-85-16-06337-5 (LP)

EDITORA MODERNA LTDA.
Rua Padre Adelino, 758 - Belenzinho
São Paulo - SP - Brasil - CEP 03303-904
Vendas e Atendimento: Tel. (0_ _11) 2602-5510
Fax (0_ _11) 2790-1501
www.moderna.com.br
2009
Impresso no Brasil

1 3 5 7 9 10 8 6 4 2

Apresentação

Nesta coleção, a Física é apresentada como uma ciência moderna e profundamente inserida em sua vida. Estudá-la, paralelamente às demais disciplinas, é um compromisso que você tem consigo mesmo, a fim de se desenvolver como cidadão, apto a contribuir, com seus conhecimentos e uma formação científica bem estruturada, para o progresso da sociedade em que vive.

Além de desenvolver o conteúdo básico de Física estabelecido para o Ensino Médio, procura-se nesta obra relacionar as leis e os fenômenos físicos ao dia a dia e ao desenvolvimento de processos tecnológicos. A exposição teórica de um assunto vem sempre acompanhada por **exercícios resolvidos**, cuja finalidade é analisar, elucidar e mesmo ampliar a teoria apresentada. Com objetivo semelhante ao dos exercícios resolvidos, há **exercícios propostos**, para que você possa exercitar e assimilar os itens teóricos. Há ainda **exercícios propostos de recapitulação**, que, além de um grau de dificuldade maior que os anteriores, têm por objetivo revisar e complementar os assuntos abordados. No final de cada capítulo, você encontra os **testes propostos**, ordenados de acordo com a exposição da teoria. **Exercícios especiais**, presentes em alguns capítulos, têm outra finalidade: aprofundar ainda mais os conteúdos e relacioná-los com conceitos vistos anteriormente. Além disso, em toda a obra são incluídas questões de vestibulares, do Enem e das Olimpíadas de Física.

Acompanhando a evolução tecnológica de nossa sociedade, em cada capítulo indicamos endereços eletrônicos (**Entre na rede**), onde o aluno poderá obter informações sobre os diversos assuntos desenvolvidos e trabalhar com animações e simulações de alguns fenômenos estudados.

No **Portal Moderna Plus**, você aluno encontra:

- Textos sobre **História da Física**, que situam no tempo os cientistas e seus feitos, com a descrição de seus estudos, suas pesquisas e suas descobertas, revelando que a ciência está em constante desenvolvimento. Complementando a biografia, criamos o item **Enquanto isso...**, em que fazemos breves considerações a respeito de personalidades importantes do período, em diferentes ramos de atividade.
- **A Física em nosso Mundo**, que são leituras especiais indicadas no final de cada capítulo, com a finalidade de mostrar que essa ciência está fortemente relacionada com a vida e o cotidiano do ser humano. Após cada uma dessas leituras, sugerimos novos exercícios em **Teste sua leitura**, para que o aluno possa aplicar os conhecimentos apresentados no texto.
- **Atividades experimentais**. A intenção desses experimentos é propiciar a você que "ponha a mão na massa", estabelecendo assim um vínculo mais profundo com a Física. Com isso, será mais fácil compreender os pilares dessa ciência e, assim o desejamos, fascinar-se com ela.

Ramalho, Nicolau e Toledo

ORGANIZAÇÃO DIDÁTICA

A Coleção *Moderna Plus Física* é composta de três livros. O conteúdo de cada ano letivo é encadernado separadamente em três partes: Parte I, Parte II e Parte III, que serão utilizadas em um ano letivo. Assim, você leva para a sala de aula apenas a Parte na qual está o conteúdo em estudo.

Abertura de Parte
Cada Parte está organizada em Unidades, com seus respectivos Capítulos.

PARTE I

PARTE I

Abertura de Unidade
No início de cada Unidade há indicação do tema sobre o qual os Capítulos que ela reúne serão trabalhados.

Abertura de Capítulo
Cada abertura de Capítulo apresenta imagem retratando situações cotidianas com a Física ou que propicia a aquisição de informações sobre assuntos relacionados ao Capítulo.

Há uma breve descrição do que será estudado no Capítulo e um foco (objetivo) para cada Seção do Capítulo.

Alguns temas foram destacados com infografias, criando oportunidade para você exercitar a leitura de imagens.

Cada infográfico apresenta algumas questões que possibilitam o estudo do tema proposto.

Leitura
Quadro com ampliação do tema com base em relatos históricos, aplicações e desenvolvimento tecnológico.

Abertura de Seção
Cada Capítulo é organizado em seções. No início de cada Seção existe a descrição dos seus Objetivos e também dos Termos e Conceitos que serão estudados nela. Os Termos e Conceitos serão retomados no *Caderno do Estudante* promovendo revisitação aos temas do Capítulo. Dessa maneira, você tem uma visão geral sobre a Seção que irá estudar.

Conteúdo digital Moderna Plus: ícone com indicação de conteúdo digital no portal do *Projeto Moderna Plus*, como leituras complementares, animações, exercícios extras, simulações e vídeos relativos ao tema estudado.

Entre na rede: sugestões de endereços eletrônicos com mais informações sobre o assunto do Capítulo, além de animações e simulações dos conteúdos trabalhados.

Exercícios resolvidos: têm como função analisar, elucidar e ampliar a teoria apresentada.
Exercícios propostos: propõem o exercício e assimilação dos conteúdos teóricos.
Exercícios propostos de recapitulação: apresentam um grau de dificuldade maior e auxiliam na revisão e complementação dos assuntos abordados.
Testes propostos: questões das provas de vestibulares mais recentes ordenadas de acordo com a exposição da teoria.
Exercícios especiais: questões de aprofundamento que se relacionam com conceitos vistos anteriormente.

SUMÁRIO GERAL

PARTE I

Unidade C — A energia térmica em trânsito

SUMÁRIO GERAL

Unidade E Óptica Geométrica

SUMÁRIO GERAL

Unidade F Ondas

SUMÁRIO GERAL

PARTE I

Unidade A

Introdução à Termologia

Unidade B

A temperatura e seus efeitos

Unidade C

A energia térmica em trânsito

Unidade D

Estudo dos gases e Termodinâmica

PARTE I

Capítulo 1

Conceitos fundamentais

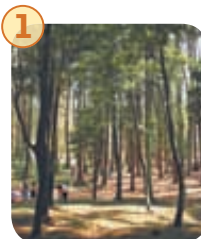
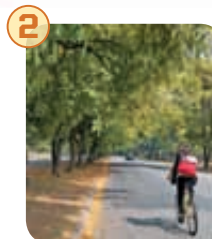
Controlar as variações de temperatura no ambiente em que vive é uma preocupação constante dos seres humanos desde os primórdios da humanidade. Aquecer-se, conservar alimentos e movimentar máquinas são exemplos de situações nas quais se pode notar a importância dos fenômenos térmicos.

A análise de aspectos macroscópicos e microscópicos propicia uma compreensão mais profunda de um mesmo fenômeno.
Do ponto de vista microscópico, podemos considerar a temperatura de um corpo com a medida do grau de agitação de suas moléculas. De um modo geral, a matéria pode se apresentar na natureza em três estados de agregação: sólido, líquido ou gasoso. A energia térmica, quando em trânsito de um corpo para outro, recebe o nome de calor.

Ilhas urbanas de calor

Em regiões urbanas ocorre um fenômeno denominado Ilha de calor que se caracteriza por apresentar temperaturas 10 °C maiores do que nas regiões adjacentes. Esse fenômeno decorre da pouca vegetação, da impermeabilização do solo e da concentração de poluentes, entre outros fatores.

A concentração urbana
A grande mancha rosada mostra o solo impermeabilizado e a grande concentração de edificações na região metropolitana de São Paulo (SP).

Diferenças regionais
Numa cidade com as dimensões de São Paulo, podemos observar diferentes microclimas, evidenciando grandes variações de temperatura ao longo da metrópole. A heterogeneidade climática pode ser justificada por fatores tão distintos quanto a alta urbanização (prédios e asfalto) e áreas de preservação ambiental, entre outros.

1 Horto Florestal
Grande cobertura vegetal, rodeada por região altamente urbanizada: temperaturas entre 28 °C e 29 °C.

2 USP
Poucos edifícios e vegetação abundante: temperaturas entre 26 °C e 28 °C.

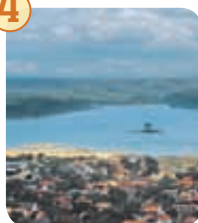
A cobertura do solo

Áreas pouco vegetadas e solos impermeabilizados reduzem a evaporação e minimizam a umidade do ar. A absorção da luz solar pelos materiais que constituem os edifícios eleva a temperatura do solo e a emissão de calor para a atmosfera.

A temperatura superficial

A temperatura ambiente média em cada região depende, entre outros fatores, da cobertura do solo. Regiões densamente urbanizadas são mais quentes, áreas próximas a vegetação e de corpos d'água são mais frias.

3 Brás

Grande concentração urbana e vias pouco arborizadas: temperaturas entre 31 ºC e 32 ºC.

4 Parelheiros

Baixa urbanização e cobertura vegetal abundante, próxima aos reservatórios de água: temperaturas entre 24 ºC e 25 ºC.

Para pensar

1. Qual é a influência da vegetação e dos corpos d'água na temperatura ambiente?
2. Por que as regiões densamente urbanizadas têm temperaturas maiores que outras regiões?

Seção 1.1

Termologia: observações macroscópicas, interpretações microscópicas

Objetivos

- Estudar a Termologia, considerando os aspectos macroscópicos e microscópicos da matéria.
- Conceituar energia térmica, calor e temperatura.
- Enunciar a lei zero da Termodinâmica.
- Caracterizar os três estados de agregação da matéria.
- Conceituar fase de um sistema e fase de uma substância.

Termos e conceitos

- termologia
- estudo macroscópico
- estudo microscópico
- energia térmica
- calor
- temperatura
- estados de agregação

Na Termologia, ramo da Física com que iniciamos o segundo volume, estudamos os fenômenos ligados à energia térmica (fenômenos térmicos). Esses fenômenos, assim como outros fenômenos físicos, podem ser interpretados sob duas perspectivas que frequentemente se completam: a macroscópica e a microscópica.

O estudo macroscópico está relacionado com os aspectos globais do sistema, como o volume que ocupa, sua temperatura e outras propriedades que podemos perceber por nossos sentidos. Ao estudar a Mecânica, no primeiro volume, geralmente adotamos o ponto de vista macroscópico, analisando apenas as propriedades do sistema na sua interação com o ambiente, como energia mecânica, posição, velocidade etc. Entretanto, muitas vezes, para uma compreensão mais aprofundada de um fenômeno, é importante adotar também o ponto de vista microscópico, considerando então grandezas que não percebemos pelos nossos sentidos e que são medidas indiretamente.

Nos fenômenos térmicos, microscopicamente, consideramos a energia das moléculas, suas velocidades, interações etc. Nessa análise, os resultados obtidos devem ser compatíveis com o estudo feito por meio de grandezas macroscópicas.

As perspectivas macroscópica e microscópica completam-se na Termologia, propiciando uma compreensão mais profunda de um mesmo fenômeno. Exemplificando, a noção de temperatura obtida a partir da sensação táctil de quente e frio (ponto de vista macroscópico) aprofunda-se ao considerarmos o movimento molecular e entendermos a temperatura a partir desse movimento (ponto de vista microscópico).

Esse entrelaçamento de perspectivas ocorre em vários outros ramos da Física, sendo característico do estudo atual dessa ciência.

Para nós, a fonte de calor mais importante é o Sol.

1 Energia térmica e calor

As moléculas constituintes da matéria estão sempre em movimento, denominado **agitação térmica**. A energia cinética associada a esse movimento é denominada **energia térmica**.

A energia térmica de um corpo pode variar. Por exemplo, se uma certa quantidade de água for colocada junto à chama de um bico de gás, o movimento de suas moléculas se torna mais intenso, isto é, sua energia térmica aumenta. Por outro lado, adicionando-se gelo à água, ocorre a diminuição do movimento molecular da água, isto é, sua energia térmica diminui. Essa ocorrência é ilustrada nas **figuras 1A e 1B**, nas quais as moléculas de água são representadas esquematicamente por pequenas esferas.

Nesses exemplos, identificamos um corpo quente (a chama do bico de gás) e um corpo frio (o gelo). Note que, ao empregar os termos "quente" e "frio", estamos utilizando uma noção subjetiva de temperatura, baseada em sensações apreendidas pelo tato. Embora seja uma forma imprecisa de caracterizar a temperatura, essa é a noção que utilizamos no dia a dia para dizer que um corpo quente está a uma temperatura mais elevada que um corpo frio.

A

B

Figura 1. **As moléculas da água quente se agitam mais intensamente.**

Ainda pelos exemplos apresentados, podemos concluir que a energia térmica transferiu-se de um corpo para outro (do bico de gás para a água, na **figura 1A**, e da água para o gelo, na **figura 1B**), em virtude da **diferença de temperatura** entre eles. À energia térmica **em trânsito** damos o nome de **calor**. Por isso não se deve falar em calor "contido" num corpo. Quando for necessário dar a ideia da energia contida num corpo, relacionada com a agitação de suas moléculas, deve-se usar a expressão **energia térmica**.

O fato de que o calor é uma forma de energia só foi definitivamente estabelecido na Física no século XIX, graças aos trabalhos dos cientistas William Thompson (conde de Rumford), Joseph Mayer e James Prescott Joule. Nos modelos aceitos até então, o calor era entendido como uma substância imponderável (fluido calórico) que se incorporava aos corpos ou sistemas.

A medida da **quantidade de calor** trocada entre dois corpos é, portanto, uma medida de energia. Sendo assim, a unidade de quantidade de calor no Sistema Internacional é o **joule** (**J**). Entretanto, a **caloria** (símbolo **cal**), unidade estabelecida antes de se entender o calor como forma de energia, continua sendo utilizada para medir as quantidades de calor.

A relação entre a caloria (cal) e o joule (J) é:

$$1 \text{ cal} = 4{,}1868 \text{ J}$$

2 Noção de temperatura

Supondo não haver mudança de fase, quando o corpo recebe energia térmica, suas moléculas passam a se agitar mais intensamente — a temperatura aumenta. Ao perder energia, as moléculas do corpo se agitam com menor intensidade — a temperatura diminui. Na **figura 2**, as moléculas do gás, representadas esquematicamente por pequenas esferas, aumentam seu grau de agitação ao receberem energia térmica da chama do bico de gás.

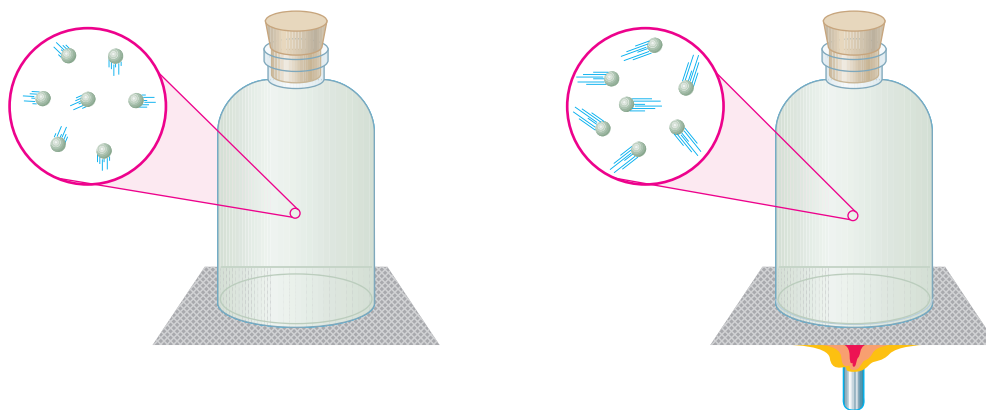



Figura 2. **As moléculas do gás, quando colocado sobre a chama, adquirem mais energia cinética, ou seja, o gás passa a apresentar uma temperatura mais elevada.**

A transferência de calor entre dois corpos, como acentuamos anteriormente, pode ser explicada pela diferença entre suas temperaturas. Quando dois corpos são colocados em presença um do outro, as moléculas do corpo quente (mais rápidas) transferem energia cinética para as moléculas do corpo frio (mais lentas). Com isso, as moléculas do corpo frio aumentam sua velocidade e as moléculas do corpo quente têm sua velocidade diminuída, até ser alcançada uma situação de equilíbrio. Em outras palavras, há transferência de energia térmica (calor) do corpo mais quente para o corpo mais frio.

A situação final de equilíbrio, caracterizada pela **igualdade das temperaturas** dos corpos, constitui o **equilíbrio térmico**. Assim, dois corpos em equilíbrio térmico possuem obrigatoriamente temperaturas iguais. Uma vez alcançada essa situação, não mais há transferência de calor entre eles.

Sendo assim, podemos concluir que: "se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si". Esse enunciado constitui a chamada **lei zero da Termodinâmica**. Assim, se um corpo A está em equilíbrio térmico com um corpo C e um corpo B também está em equilíbrio térmico com o corpo C, então os corpos A e B estão em equilíbrio térmico entre si.

3 Os estados de agregação da matéria

Estamos habituados com o fato de a água apresentar-se como líquido, sólido ou vapor, podendo passar de uma para outra situação. Assim, como se mostra na **figura 3**, um cubo de gelo (sólido) pode derreter, passando a líquido; e este, por aquecimento, pode passar a vapor.

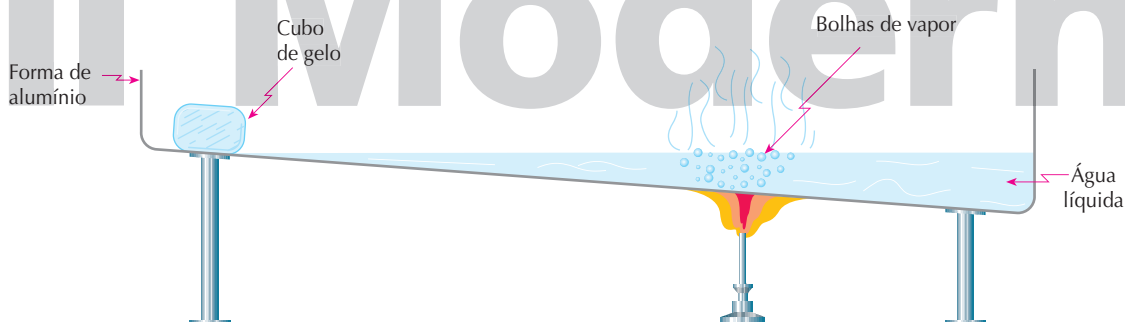



Figura 3. Esquema de um dispositivo em que o gelo se transforma em água líquida, e esta, por aquecimento, se transforma em vapor.

Sólido, **líquido** e **gasoso** constituem os **estados de agregação da matéria** (há uma diferença física entre gás e vapor que discutiremos em outro capítulo, mas ambos correspondem ao estado gasoso). De modo geral, os materiais que nos rodeiam se encontram em um desses estados de agregação.

Um sólido tem volume e forma definidos. Um líquido assume a forma do recipiente que o contém, mas seu volume é definido. Um gás ou um vapor preenche totalmente um recipiente fechado no qual seja colocado, qualquer que seja a forma deste. Portanto, gases e vapores não têm forma nem volume definidos: a forma e o volume são do recipiente no qual se encontram.

Para explicar esses estados de agregação, admite-se que qualquer material é formado de moléculas e que estas estão em movimento, mais intenso ou menos intenso, com maior ou menor liberdade, conforme a intensidade das forças de coesão* entre elas.

* Chamam-se **forças de coesão** as forças que se desenvolvem entre moléculas de mesma natureza, e **forças de adesão** as que se desenvolvem entre moléculas de naturezas diferentes.

No **estado sólido**, as forças de coesão são muito intensas, restringindo o movimento das moléculas a uma ligeira vibração em torno de uma posição média. Na **figura 4**, que representa esquematicamente as moléculas, esse movimento restrito é mostrado em **A** (no destaque). Por conseguinte, as moléculas, fortemente coesas, dispõem-se com regularidade, geralmente formando uma rede cristalina. Assim, os sólidos apresentam forma e volume definidos.

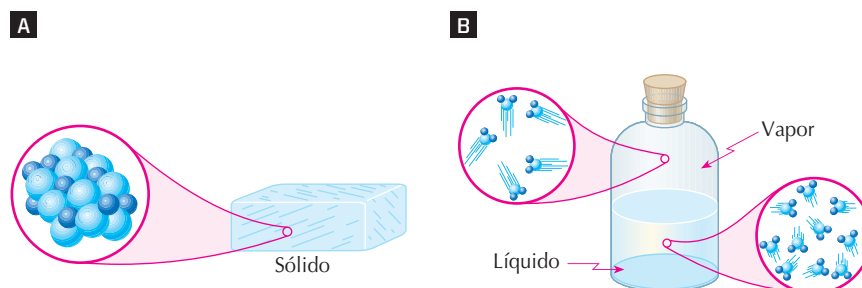



Figura 4. **Representação esquemática de como se apresentam as moléculas do corpo no estado sólido (A) e nos estados líquido e gasoso (B).**

No **estado líquido**, as distâncias entre as moléculas são, em média, maiores que no estado sólido. No entanto, as forças de coesão ainda são apreciáveis e a liberdade de movimentação das moléculas é limitada, havendo apenas o deslizamento de umas em relação às outras (**fig. 4B**). Em consequência, os líquidos apresentam volume definido, mas sua forma é variável, adaptando-se à do recipiente.

No **estado gasoso**, as forças de coesão entre as moléculas têm intensidade muito pequena, possibilitando uma movimentação bem mais intensa que nos outros estados (**fig. 4B**). Consequentemente, os gases e vapores têm a propriedade de se difundir por todo o espaço em que se encontram, não apresentando nem forma nem volume definidos.

Tanto uma mistura gasosa como uma mistura homogênea de líquidos apresentam uma única fase – a fase gasosa, no primeiro caso, e a fase líquida, no segundo. Uma pedra de gelo flutuando na água constitui um sistema com duas fases distintas: a fase sólida e a fase líquida. Assim, **fase** de um sistema é uma parte geometricamente definida e fisicamente homogênea desse sistema. Por isso, podemos nos referir aos estados de agregação de uma substância como fases da substância.

A água pode se apresentar, na Natureza, em suas três fases: **líquida**, no mar, nos lagos e rios e nas nuvens (em forma de gotículas em suspensão na atmosfera); **vapor**, em mistura com os gases que constituem o ar; **sólida**, nas geleiras, nos *icebergs* e nas crostas de gelo que cobrem os picos das montanhas mais elevadas.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaApp/Mole/e-Mole.html (acesso em julho/2009), você poderá, por meio de uma simulação, analisar a diferença entre os estados sólido, líquido e gasoso de uma substância.

TESTES PROPOSTOS

T. 1 (PUC-Campinas-SP) Sobre o conceito de calor, pode-se afirmar que se trata de uma:

a) medida da temperatura do sistema.
b) forma de energia em trânsito.
c) substância fluida.
d) quantidade relacionada com o atrito.
e) energia que os corpos possuem.

T. 2 (UFSM-RS) Calor é:

a) a energia contida em um corpo.
b) a energia que se transfere de um corpo para outro, quando existe uma diferença de temperatura entre eles.
c) um fluido invisível e sem peso, que é transmitido de um corpo para outro.
d) a transferência de temperatura de um corpo para outro.
e) a energia que se transfere espontaneamente do corpo de menor temperatura para o de maior temperatura.

T. 3 (Unifesp) O SI (Sistema Internacional de Unidades) adota como unidade de calor o joule, pois calor é energia. No entanto, só tem sentido falar em calor como **energia em trânsito**, ou seja, energia que se transfere de um corpo a outro em decorrência da diferença de temperatura entre eles. Assinale a afirmação em que o conceito de calor está empregado corretamente.

a) A temperatura de um corpo diminui quando ele perde parte do calor que nele estava armazenado.
b) A temperatura de um corpo aumenta quando ele acumula calor.
c) A temperatura de um corpo diminui quando ele cede calor para o meio ambiente.
d) O aumento da temperatura de um corpo é um indicador de que esse corpo armazenou calor.
e) Um corpo só pode atingir o zero absoluto se for esvaziado de todo o calor nele contido.

T. 4 (Unisa-SP) O fato de o calor passar de um corpo para outro deve-se:

a) à quantidade de calor existente em cada um.
b) à diferença de temperatura entre eles.
c) à energia cinética total de suas moléculas.
d) ao número de calorias existentes em cada um.
e) Nada do que se afirmou acima é verdadeiro.

T. 5 (UFPR) No século XVII, uma das interpretações para a natureza do calor considerava-o um fluido imponderável que preenchia os espaços entre os átomos dos corpos quentes. Essa interpretação explicava corretamente alguns fenômenos, porém, falhava em outros. Isso motivou a proposição de uma outra interpretação, que teve origem em trabalhos de Mayer, Rumford e Joule, entre outros pesquisadores.
Com relação aos conceitos de temperatura, calor e trabalho atualmente aceitos pela Física, avalie as seguintes afirmativas:

I. Temperatura e calor representam o mesmo conceito físico.
II. Calor e trabalho estão relacionados com transferência de energia.
III. A temperatura de um gás está relacionada com a energia cinética de agitação de suas moléculas.

Assinale a alternativa correta.

a) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.
b) Somente a afirmativa I é verdadeira.
c) Somente a afirmativa II é verdadeira.
d) Somente a afirmativa III é verdadeira.
e) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.

T. 6 (UFV-MG) Quando dois corpos de materiais diferentes estão em equilíbrio térmico, isolados do meio ambiente, pode-se afirmar que:

a) o mais quente é o que possui menor massa.
b) apesar do contato, suas temperaturas não variam.
c) o mais quente fornece calor ao mais frio.
d) o mais frio fornece calor ao mais quente.
e) suas temperaturas dependem de suas densidades.

T. 7 (UFRGS-RS) Selecione a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto abaixo, na ordem em que elas aparecem.

Quando um corpo mais quente entra em contato com um corpo mais frio, depois de certo tempo ambos atingem a mesma temperatura. O que será que "passa" de um corpo para o outro quando eles estão a diferentes temperaturas? Será que é transferida a própria temperatura?

Em 1770, o cientista britânico Joseph Black obteve respostas para essas questões. Ele mostrou que, quando misturamos partes iguais de um líquido (leite, por exemplo) a temperaturas iniciais diferentes, as temperaturas de ambas as partes ________ significativamente; no entanto, se derramarmos um copo de leite morno num balde cheio de água com vários cubos de gelo fundente, e isolarmos esse sistema como um todo, a temperatura do leite sofrerá uma mudança significativa, mas a temperatura da mistura de água e gelo não. Com esse simples experimento, fica confirmado que "aquilo" que é transferido nesse processo ________ a temperatura.

A fim de medir a temperatura da mistura de gelo e água, um termômetro, inicialmente à temperatura ambiente, é introduzido no sistema e entra em equilíbrio térmico com ele. Nesse caso, o termômetro ________ uma variação em sua própria temperatura.

a) mudam — não é — sofre
b) não mudam — é — sofre
c) mudam — não é — não sofre
d) mudam — é — não sofre
e) não mudam — é — não sofre

T. 8 (Fatec-SP) Três corpos encostados entre si estão em equilíbrio térmico. Nessa situação:

a) os três corpos apresentam-se no mesmo estado físico.
b) a temperatura dos três corpos é a mesma.
c) o calor contido em cada um deles é o mesmo.
d) o corpo de maior massa tem mais calor que os outros dois.
e) há mais de uma proposição correta.

T. 9 Dois corpos A e B, de massas m_A e m_B tais que $m_A > m_B$, estão às temperaturas θ_A e θ_B, respectivamente, com $\theta_A \neq \theta_B$. Num dado instante, eles são postos em contato. Ao alcançarem o equilíbrio térmico, teremos para as temperaturas finais θ'_A e θ'_B:

a) $\theta'_A > \theta'_B$ b) $\theta'_A = \theta'_B$ c) $\theta'_A < \theta'_B$ d) $\theta'_A \neq \theta'_B$

T. 10 Se dois corpos estiverem em equilíbrio térmico com um terceiro, conclui-se que:

a) os três acham-se em repouso.
b) os dois corpos estão em equilíbrio térmico entre si.
c) a diferença entre as temperaturas dos corpos é diferente de zero.
d) a temperatura do terceiro corpo aumenta.
e) os dois corpos possuem a mesma quantidade de calor.

T. 11 (FEI-SP) Um sistema isolado termicamente do meio possui três corpos, um de ferro, um de alumínio e outro de cobre. Após um certo tempo, verifica-se que as temperaturas do ferro e do alumínio aumentaram. Podemos concluir que:

a) o corpo de cobre também aumentou a sua temperatura.
b) o corpo de cobre ganhou calor do corpo de alumínio e cedeu calor para o corpo de ferro.
c) o corpo de cobre cedeu calor para o corpo de alumínio e recebeu calor do corpo de ferro.
d) o corpo de cobre permaneceu com a mesma temperatura.
e) o corpo de cobre diminuiu a sua temperatura.

T. 12 As forças de coesão entre as moléculas de uma substância:

a) são mais intensas no estado gasoso do que nos estados sólido e líquido, em virtude de maior agitação.
b) são menos intensas no estado sólido do que nos estados gasoso e líquido, em vista da estrutura cristalina.
c) não dependem do estado de agregação da substância.
d) têm maior intensidade no estado sólido e menos intensidade no estado gasoso.
e) têm intensidade desprezível no estado sólido.

Capítulo 2

Termometria

Um dos primeiros dispositivos para avaliar as temperaturas foi criado por Galileu no século XVII. Desde então, esses equipamentos foram se tornando mais sofisticados e hoje se tem a possibilidade de medir com precisão temperaturas extremamente baixas, como a do nitrogênio líquido, ou extremamente elevadas, como a dos metais incandescentes nas siderúrgicas.

Para desenvolver o estudo da medida de temperatura, é de fundamental importância o conhecimento dos critérios adotados para a criação das escalas termométricas, tanto as escalas relativas usuais – Celsius e Fahrenheit – como a escala absoluta Kelvin, estabelecida com base no conceito de zero absoluto.

Seção 2.1

Medida da temperatura

Objetivos

- Conceituar grandeza termométrica.
- Relacionar as grandezas termométricas e as medidas de temperaturas.
- Descrever o termômetro de mercúrio.

Termos e conceitos

- sensação térmica
- substância termométrica
- grandeza termométrica
- função termométrica
- termômetro

Frequentemente usamos os termos frio, quente, morno etc. para traduzir a sensação que temos ao entrar em contato com um sistema. Assim, do mesmo modo que a luz impressiona nossa visão (sensação luminosa) e que o som impressiona nossa audição (sensação sonora), é o sentido do tato que nos proporciona a **sensação térmica**, que constitui a primeira noção de temperatura de um sistema.

Esse critério sensorial para avaliar temperaturas, no entanto, é impreciso, pois depende da pessoa que sente e das condições nas quais se encontrava anteriormente.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Sensação térmica*

Termômetro

Para tornar mais precisa a noção de temperatura, recorremos às variações que certas propriedades dos corpos sofrem quando muda a sensação térmica. Por exemplo, o comprimento de uma barra aumenta (dilatação) quando ela se torna mais quente. Desse modo, a temperatura θ da barra pode ser avaliada indiretamente pelo valor assumido por seu comprimento L (**fig. 1**).

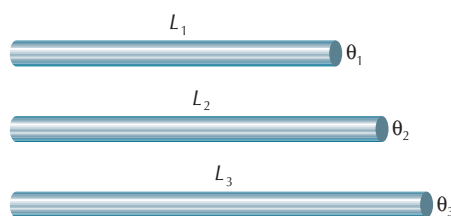



Figura 1. A cada valor L do comprimento da barra corresponde um valor θ de temperatura.

De modo geral, sendo x uma grandeza conveniente que define uma das propriedades do corpo (como o comprimento L, no caso da barra), a cada valor de x faz-se corresponder um determinado valor θ de temperatura.

A grandeza x é denominada **grandeza termométrica**. A correspondência entre os valores da grandeza x e da temperatura θ constitui a função termométrica. Ao corpo em observação dá-se o nome de **termômetro**. A barra da **figura 1**, na qual a cada valor do comprimento L (grandeza termométrica) corresponde um valor da temperatura θ, poderia, em princípio, ser usada como termômetro.

Até o advento dos modernos termômetros digitais, que usam recursos da eletrônica na medida da temperatura, os termômetros mais utilizados eram os de mercúrio, como o representado na **figura 2**. O **termômetro de mercúrio** baseia-se na dilatação de certa quantidade de mercúrio contido num recipiente de vidro (bulbo), ligado a um tubo capilar, isto é, um tubo de diâmetro bem pequeno. A escolha do mercúrio como **substância termométrica** deve-se ao fato de ser um líquido de dilatação regular numa faixa de temperaturas bem ampla. Além disso, o mercúrio é facilmente visualizável, por ser opaco e brilhante. Nas considerações seguintes, admitiremos sempre a utilização de termômetros de mercúrio no estudo das escalas de temperatura.

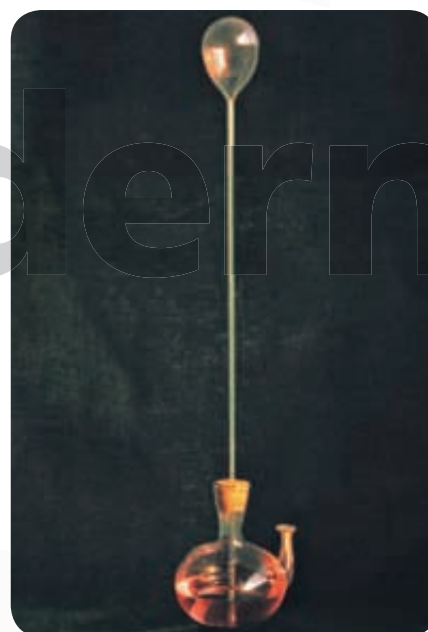
O emprego do termômetro para avaliação da temperatura de um sistema fundamenta-se no fato de que, após algum tempo em contato, o sistema e o termômetro adquirem a mesma temperatura, isto é, alcançam o equilíbrio térmico.

Figura 2. O termômetro de mercúrio.

O "termômetro" de Galileu

Um dos primeiros dispositivos criados para avaliar temperaturas foi o **termoscópio a ar** inventado por Galileu, do qual se vê uma réplica na foto. Esse termoscópio não pode ser considerado propriamente um termômetro, uma vez que não estabelece valores numéricos para a temperatura — ele apenas indica se um corpo está mais quente ou mais frio que outro, tomado como referência.

O termoscópio de Galileu é constituído de um bulbo ligado a um tubo de vidro que tem a extremidade inferior imersa em um líquido. Quando a temperatura do ar contido no bulbo aumenta, a pressão do ar também aumenta e o nível do líquido desce. Quando a temperatura do ar diminui, a pressão do ar diminui e o nível do líquido sobe. Consta que, originalmente, Galileu teria usado vinho no seu termoscópio para visualizar melhor o nível do líquido.

Antes dos primeiros termômetros, outros termoscópios foram construídos. Em 1631, o médico e químico francês Jean Rey (1583-1645) conectou um tubo vertical aberto a um recipiente cheio de água. Nesse aparelho, com o aumento da temperatura, a água subia pelo tubo. Embora a substância termométrica fosse o líquido e não o ar, a imprecisão ainda era grande, devido à influência da pressão atmosférica, à pouca dilatação da água e à evaporação do líquido.

O princípio de funcionamento do termoscópio é hoje utilizado em brinquedos como o da figura. Colocando-se a mão em contato com o recipiente inferior, o líquido é aquecido, dilata-se e sobe.

Seção 2.2

Graduação de um termômetro. Escalas termométricas

Objetivos

- Conceituar escala termométrica.
- Descrever o procedimento para se graduar um termômetro.
- Utilizar diferentes escalas termométricas.
- Relacionar as temperaturas nas escalas Celsius e Fahrenheit.
- Converter as variações de temperatura medidas nas escalas Celsius e Fahrenheit.
- Conhecer as diferentes grandezas termométricas.

Termos e conceitos

- **ponto do gelo**
- **ponto do vapor**
- **função termométrica**
- **hipertermia**
- **hipotermia**

O conjunto dos valores numéricos que a temperatura θ pode assumir constitui uma escala termométrica, que é estabelecida ao se graduar um termômetro.

Para a graduação de um termômetro comum de mercúrio procede-se da seguinte maneira:

1º) Escolhem-se dois sistemas cujas temperaturas sejam invariáveis no decorrer do tempo e que possam ser reproduzidos facilmente quando necessário. Essas temperaturas são denominadas pontos fixos, sendo usualmente escolhidas:

- ponto do gelo (θ_G) — temperatura de fusão do gelo sob pressão normal (1 atm);
- ponto do vapor (θ_V) — temperatura de ebulição da água sob pressão normal (1 atm).

2º) O termômetro é colocado em presença dos sistemas que definem os pontos fixos (**fig. 3**). A cada um deles vai corresponder uma altura da coluna líquida. A cada altura atribui-se um valor numérico arbitrário de temperatura, geralmente fazendo o menor corresponder ao ponto do gelo (θ_G), e o outro, ao ponto do vapor (θ_V).

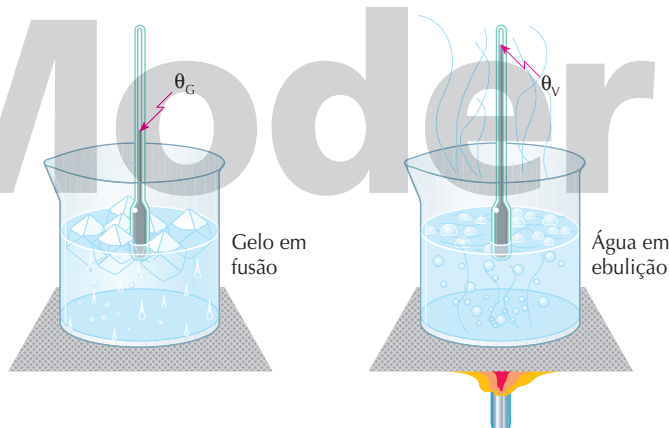



Figura 3. Graduação de um termômetro: θ_G indica a temperatura da fusão do gelo, e θ_V, a temperatura da ebulição da água, sob pressão normal.

3º) O intervalo delimitado entre as marcações feitas (correspondentes às temperaturas θ_V e θ_G) é dividido em partes iguais. Cada uma das partes em que fica dividido o intervalo é a unidade da escala (o **grau** da escala).

Atualmente a escala mais usada é a **escala Celsius***, que adota os valores 0 (zero) para o ponto do gelo e 100 para o ponto do vapor (**fig. 4**). O intervalo entre os pontos fixos é dividido em cem partes**. Cada uma dessas cem partes é a unidade da escala, o **grau Celsius**, cujo símbolo é **°C**.

* **CELSIUS**, Anders (1701-1744), astrônomo e físico sueco. Dedicou-se principalmente à Astronomia, tornando-se professor dessa ciência em 1730. Em 1948 seu nome foi adotado para a escala que criou.

** Toda escala em que o intervalo entre o ponto do gelo e o ponto do vapor é dividido em cem partes é dita **centesimal** ou **centígrada**. A escala Celsius é uma escala centesimal ou centígrada, mas não é a única.

Em alguns países usa-se a **escala Fahrenheit***, que adota os valores 32 para o ponto do gelo e 212 para o ponto do vapor (**fig. 5**). O intervalo é dividido em 180 partes, cada uma das quais corresponde ao **grau Fahrenheit**, cujo símbolo é **°F**.

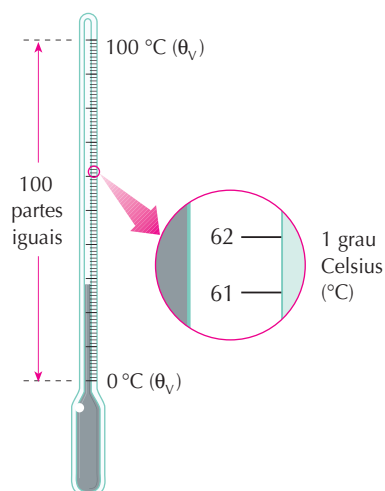



Figura 4. **Escala Celsius.**

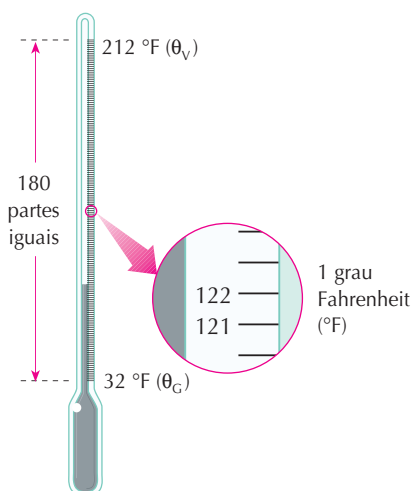



Figura 5. **Escala Fahrenheit.**

Note que a escolha dos valores que definem a escala é arbitrária: na escala Celsius os valores de θ_G e θ_V são 0 (zero) e 100, enquanto na escala Fahrenheit os valores são 32 e 212.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
História da Física: *A história do termômetro e das escalas termométricas*

1 Conversão entre as escalas Celsius e Fahrenheit

Às vezes é necessário transformar a indicação da escala Fahrenheit na correspondente indicação da escala Celsius ou vice-versa. Para obtermos a relação entre as leituras nas duas escalas, devemos estabelecer a proporção entre os segmentos *a* e *b* (**fig. 6**), determinados no capilar do termômetro.

Sejam θ_C a leitura em graus Celsius e θ_F a leitura em graus Fahrenheit para a temperatura de um sistema. A relação entre os segmentos *a* e *b* não depende da unidade em que são expressos. Assim:

$$\frac{a}{b} = \frac{\theta_C - 0}{100 - 0} = \frac{\theta_F - 32}{212 - 32} \Rightarrow \frac{\theta_C}{100} = \frac{\theta_F - 32}{180}$$

Simplificando:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

Isolando θ_C e θ_F, vem:

$$\theta_C = \frac{5}{9}(\theta_F - 32) \quad \text{e} \quad \theta_F = 1{,}8\theta_C + 32$$

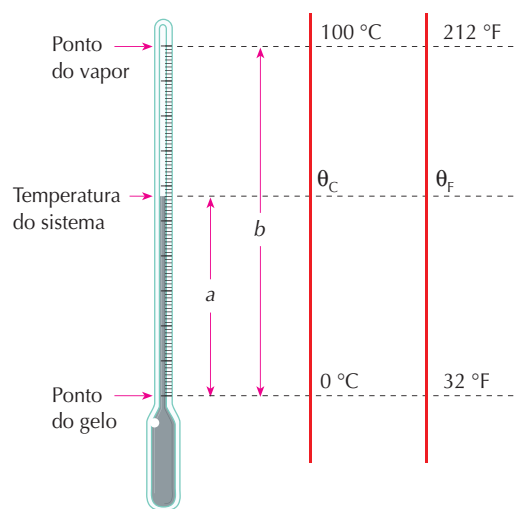



Figura 6. **Conversão entre as leituras nas escalas Celsius e Fahrenheit.**

* **FAHRENHEIT**, Daniel Gabriel (1686-1736), físico alemão. Foi quem propôs, em 1714, a utilização do mercúrio em vez de álcool nos termômetros. Em 1724 foi eleito membro da Sociedade Real inglesa.

A medida da temperatura corporal

A avaliação da temperatura do corpo humano é de grande importância na Medicina. Quando a temperatura corporal aumenta além de 37 °C (que pode ser considerado um valor médio normal), dizemos que a pessoa está com **febre** ou **hipertermia**. Há também situações de anormalidade em que a temperatura diminui abaixo de 37 °C, caracterizando uma **hipotermia**.

Os termômetros utilizados na medida da temperatura corporal são denominados **termômetros clínicos**. Atualmente existe um grande número deles no mercado, a maior parte do tipo digital. Entretanto, ainda é muito difundido o termômetro clínico de mercúrio. Nele, junto ao bulbo, no início do tubo capilar, há um estreitamento, que não impede a movimentação da coluna líquida quando a temperatura sobe e o mercúrio se dilata. Entretanto, se a temperatura diminuir, o mercúrio não consegue voltar para o bulbo, continuando a indicar a maior temperatura que foi medida. Portanto, trata-se de um termômetro de máxima. Para ser usado novamente, o termômetro deve ser vigorosamente sacudido, de tal maneira que o mercúrio retorne ao bulbo.

O termômetro clínico da foto está graduado nas escalas Celsius (entre 35 °C e 42 °C) e Fahrenheit (entre 94 °F e 108 °F). A graduação é feita apenas entre esses valores porque eles correspondem, aproximadamente, aos limites extremos da temperatura do corpo humano.

O estreitamento no tubo capilar impede o retorno do mercúrio ao bulbo, fixando a marcação da temperatura máxima.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 1 A temperatura média do corpo humano é 36,5 °C. Determine o valor dessa temperatura na escala Fahrenheit.

Solução:

Comparando as escalas Celsius e Fahrenheit, obtemos:

$$\frac{\theta_C}{100} = \frac{\theta_F - 32}{180} \quad \text{ou}$$

$$\text{ou} \quad \boxed{\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}}$$

100 °C — 212 °F; θ_C — θ_F; 0 °C — 32 °F

Sendo $\theta_C = 36{,}5$ °C, vem:

$$\frac{36{,}5}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9} \Rightarrow$$

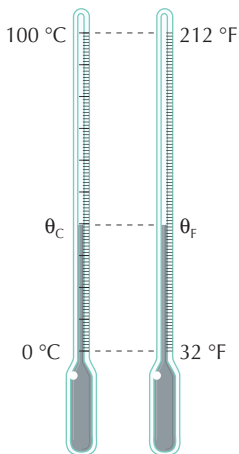
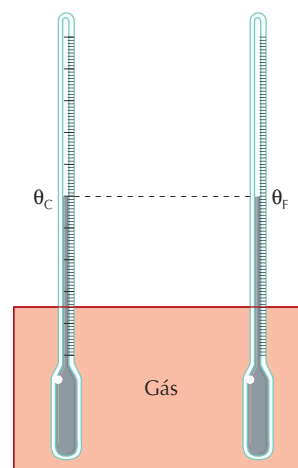
$$\Rightarrow 7{,}3 = \frac{\theta_F + 32}{9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 65{,}7 = \theta_F - 32 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta_F = 97{,}7 \text{ °F}}$$

Resposta: 97,7 °F

Observação:

Na escala Fahrenheit, a temperatura do corpo humano está normalmente em torno de 100 °F.

R. 2 Dois termômetros, um graduado na escala Celsius e o outro na escala Fahrenheit, fornecem a mesma leitura para a temperatura de um gás. Determine o valor dessa temperatura.

Solução:

Se a temperatura do gás é indicada pelo mesmo número nas escalas Celsius e Fahrenheit, podemos escrever:

$$\theta_C = X \text{ °C} \qquad \theta_F = X \text{ °F}$$

Substituindo na expressão de conversão, vem:

$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9} \Rightarrow \frac{X}{5} = \frac{X - 32}{9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 9X = 5X - 160 \Rightarrow 4X = -160 \Rightarrow X = -40$$

Portanto: $\boxed{\theta_C = -40\ °C}$ e $\boxed{\theta_F = -40\ °F}$

Resposta: −40 °C e −40 °F

Observe que essa é a **única temperatura** indicada pelo mesmo valor nessas duas escalas.

R. 3 Certa escala termométrica adota os valores −20 e 580, respectivamente, para os pontos do gelo e do vapor. Determine:

a) a fórmula de conversão entre essa escala e a escala Celsius;

b) a indicação que nessa escala corresponde a 20 °C.

Solução:

a) Comparando a escala Celsius (C) e a escala (E) criada neste exercício, temos:

100 °C — 580 °E; θ_C — θ_E; 0 °C — −20 °E; a; b

$$\frac{a}{b} = \frac{\theta_C - 0}{100 - 0} = \frac{\theta_E - (-20)}{580 - (-20)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{\theta_C}{100} = \frac{\theta_E + 20}{600}$$

Simplificando:

$$\theta_C = \frac{\theta_E + 20}{6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 6\theta_C = \theta_E + 20 \Rightarrow$$

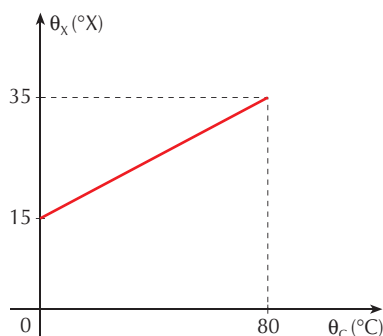
$$\Rightarrow \boxed{\theta_E = 6\theta_C - 20}$$

b) Para determinar a indicação θ_E que corresponde a $\theta_C = 20$ °C, usamos a relação anterior:

$$\theta_E = 6\theta_C - 20 \Rightarrow \theta_E = 6 \cdot 20 - 20 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta_E = 120 - 20 \Rightarrow \boxed{\theta_E = 100\ °E}$$

Resposta: a) $\theta_E = 6\theta_C - 20$; b) 100 °E

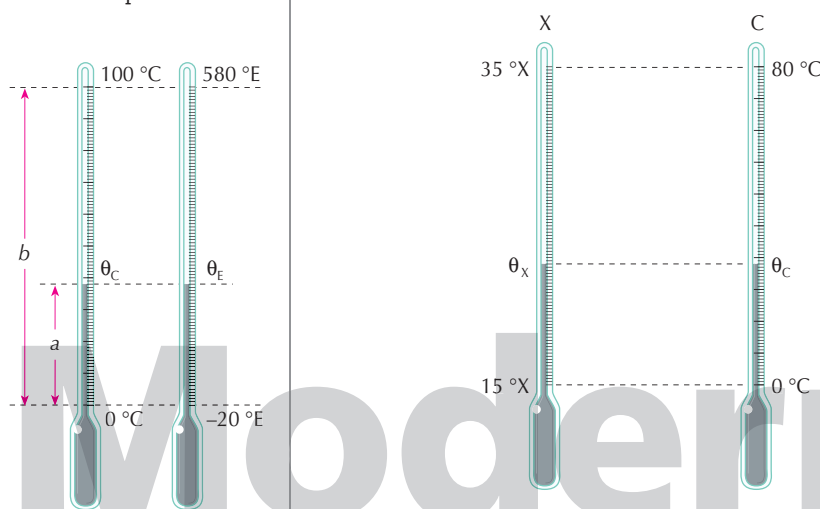
R. 4 Uma escala termométrica X relaciona-se com a escala Celsius segundo o gráfico apresentado, no qual em ordenadas se representam os valores de θ_X (temperaturas expressas na escala X) e em abscissas os valores de θ_C (temperaturas expressas na escala Celsius).

a) Estabeleça a fórmula de conversão entre as duas escalas.

b) Determine a temperatura registrada por um termômetro graduado na escala X quando a temperatura for 50 °C.

c) Determine que temperatura registra um termômetro graduado na escala Celsius para um sistema em que o termômetro graduado na escala X registra 10 °X.

d) Há uma temperatura em que os dois termômetros (graduados na escala X e na escala Celsius, respectivamente) registram valores que coincidem numericamente. Qual é essa temperatura?

Solução:

a) Analisando o gráfico, verificamos que 15 °X correspondem a 0 °C e 35 °X correspondem a 80 °C.

Comparando as escalas, obtemos:

$$\frac{\theta_X - 15}{35 - 15} = \frac{\theta_C - 0}{80 - 0} \Rightarrow \frac{\theta_X - 15}{20} = \frac{\theta_C}{80} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta_X - 15 = \frac{\theta_C}{4} \Rightarrow \theta_X = \frac{\theta_C}{4} + 15 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta_X = 0{,}25\theta_C + 15}$$

b) Para $\theta_C = 50$ °C, vem:

$$\theta_X = 0{,}25 \cdot 50 + 15 \Rightarrow \theta_X = 12{,}5 + 15 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta_X = 27{,}5\ °X}$$

c) Para $\theta_X = 10$ °X, vem:

$$10 = 0{,}25\theta_C + 15 \Rightarrow 0{,}25\theta_C = -5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\theta_C = -20\ °C}$$

d) Se os valores coincidem numericamente nas duas escalas, temos: $\theta_X = \theta_C = \theta$. Na fórmula de conversão, temos:

$$\theta = 0{,}25\theta + 15 \Rightarrow \theta - 0{,}25\theta = 15 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0{,}75\theta = 15 \Rightarrow \theta = 20$$

Portanto: $\boxed{\theta_X = 20\ °X}$ e $\boxed{\theta_C = 20\ °C}$

Respostas: a) $\theta_X = 0{,}25\theta_C + 15$; b) 27,5 °X; c) −20 °C; d) 20 °X; 20 °C

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.1 Complete a tabela:

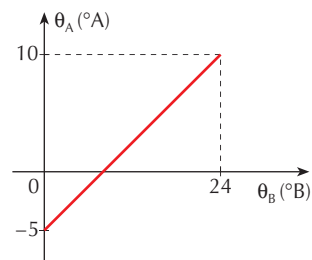
Celsius	Fahrenheit
400 °C	
	99,5 °F
180 °C	
	−49 °F

P.2 Medindo a temperatura de um líquido com dois termômetros, um de escala Celsius e o outro de escala Fahrenheit, um estudante verificou que ambos davam a mesma indicação em módulo, porém os sinais eram diferentes. Determine a temperatura do líquido.

P.3 No deserto do Saara registrou-se certo dia a temperatura de X °C. Se a escala utilizada tivesse sido a Fahrenheit, a leitura seria 72 unidades mais alta. Determine o valor dessa temperatura.

P.4 Uma escala arbitrária adota os valores 5 e 365 para os pontos fixos fundamentais (ponto do gelo e ponto do vapor, respectivamente). Determine que indicação nessa escala corresponde ao 0 °F.

P.5 Na temperatura do ponto do gelo um termômetro defeituoso marca −0,3 °C e na temperatura de ebulição da água sob pressão normal +100,2 °C. Determine qual é a única indicação correta desse termômetro. (Sugestão: admita que o termômetro defeituoso crie uma nova escala.)

P.6 O gráfico indica como se relacionam as leituras θ_A e θ_B para as temperaturas registradas por dois termômetros graduados respectivamente nas escalas A e B.

Determine:

a) a fórmula de conversão entre θ_A e θ_B;

b) a indicação do termômetro graduado na escala A quando o outro registra 96 °B;

c) a indicação do termômetro graduado na escala B quando o outro registra 0 °A;

d) a temperatura em que coincidem as leituras nos dois termômetros.

2 Variação de temperatura

Consideremos que a temperatura de um sistema varie de um valor inicial θ_1 para um valor final θ_2 num dado intervalo de tempo. A variação de temperatura $\Delta\theta$ é dada pela diferença entre o valor final θ_2 e o valor inicial θ_1:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

Assim, a variação de temperatura será positiva ($\Delta\theta > 0$) quando a temperatura aumentar ($\theta_2 > \theta_1$); negativa ($\Delta\theta < 0$) quando a temperatura diminuir ($\theta_2 < \theta_1$); e será nula ($\Delta\theta = 0$) quando a temperatura final for igual à inicial ($\theta_2 = \theta_1$).

Vamos correlacionar as variações de temperatura expressas na escala Celsius ($\Delta\theta_C$) e na Fahrenheit ($\Delta\theta_F$). Na **figura 7**, a relação entre os segmentos *a* (correspondente à variação de temperatura ocorrida) e *b* (correspondente ao intervalo entre as temperaturas do ponto do gelo e do ponto do vapor) não depende da unidade em que são expressos.

Figura 7. Conversão entre variações de temperatura.

Então: $\dfrac{a}{b} = \dfrac{\Delta\theta_C}{100 - 0} = \dfrac{\Delta\theta_F}{212 - 32} \Rightarrow \dfrac{\Delta\theta_C}{100} = \dfrac{\Delta\theta_F}{180}$

Simplificando: $$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9}$$

Isolando $\Delta\theta_C$ e $\Delta\theta_F$, vem:

$$\Delta\theta_C = \frac{5}{9}\Delta\theta_F \quad \text{e} \quad \Delta\theta_F = 1{,}8\,\Delta\theta_C$$

V2_P1_UN_B_CAP_02.indd 29 22.08.09 08:48:31

O termômetro de máxima e mínima

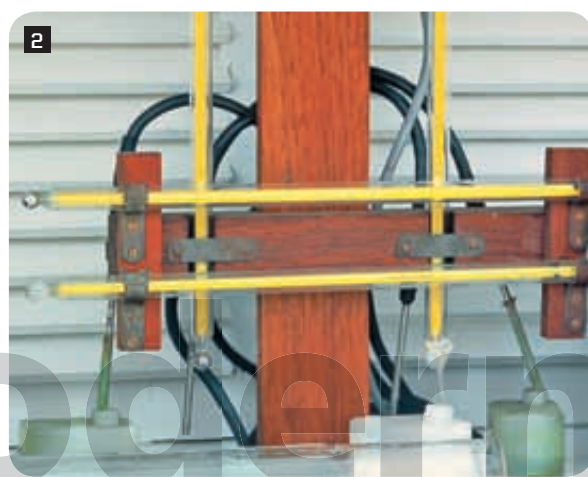
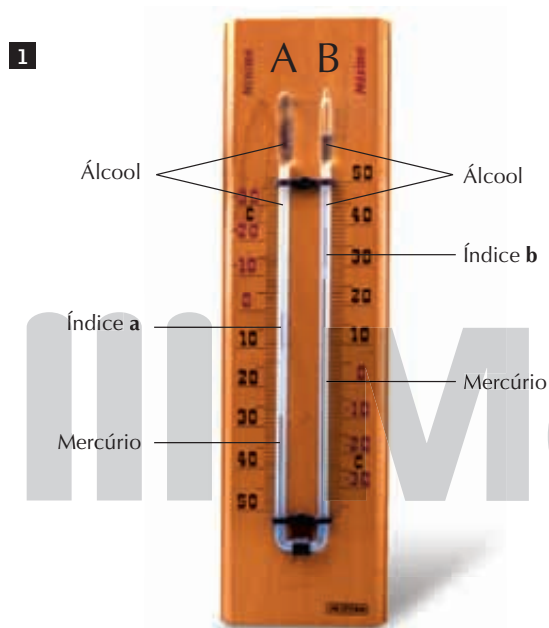
As temperaturas máxima e mínima de um ambiente, em dado intervalo de tempo, são registradas por um tipo especial de termômetro: o **termômetro de máxima e mínima**.

O termômetro apresentado na figura 1 é constituído de dois bulbos (**A** e **B**), ligados a um tubo em U de pequeno diâmetro, o qual contém mercúrio na parte inferior. O bulbo **A**, o ramo esquerdo e o ramo direito do tubo estão completamente cheios de álcool. O bulbo **B**, por sua vez, está parcialmente cheio de álcool. Nos ramos do termômetro existem dois índices de ferro esmaltado (**a** e **b**), banhados pelo álcool e aderentes à parede interna do tubo. O índice **a** indica a menor temperatura e o índice **b** indica a maior temperatura ocorrida num determinado período.

Inicialmente os índices são colocados em contato com as superfícies livres do mercúrio, nos dois ramos, com o auxílio de um pequeno ímã.

Quando ocorre um aumento de temperatura, o álcool do bulbo **A** se dilata. Com isso, o nível do mercúrio no ramo esquerdo desce (sem arrastar o índice **a**) e o nível do mercúrio no ramo direito sobe, arrastando o índice **b** para cima, de modo a indicar a máxima temperatura ocorrida.

1

2

Nas estações meteorológicas, os termômetros de máxima e de mínima ficam dispostos na horizontal. Os termômetros na vertical são destinados à determinação da umidade do ar.

Quando há uma diminuição de temperatura, o álcool de **A** se contrai. Com isso, o nível do mercúrio no ramo direito desce (sem arrastar o índice **b**) e o nível do mercúrio no ramo esquerdo sobe, arrastando o índice **a** para cima, de modo a indicar a mínima temperatura ocorrida.

Observe na figura 1 que a temperatura máxima foi de 30 °C, a mínima de 10 °C e a temperatura num determinado momento era de 27 °C (indicada pelo nível de mercúrio nos dois lados).

Os boletins meteorológicos, divulgados na tevê, na internet, no rádio e em jornais, geralmente informam as temperaturas máxima e mínima em várias cidades do planeta. Muitas vezes, essas temperaturas são avaliadas com o uso de termômetros desse tipo.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 5 Em certo dia, na cidade de Salvador, o serviço de meteorologia anunciou uma temperatura máxima de 40 °C e uma mínima de 25 °C.

a) Qual é a variação de temperatura entre os instantes em que foram assinaladas as temperaturas máxima e mínima?

b) Qual é o valor dessa variação de temperatura expresso na escala Fahrenheit?

Solução:

a) Quando o serviço de meteorologia anuncia a temperatura máxima e a temperatura mínima de um dia, usualmente não indica qual delas ocorreu antes. Assim, temos duas hipóteses a considerar:

1ª hipótese — A temperatura mínima ocorreu **antes** da máxima.

Então: $\theta_1 = 25$ °C e $\theta_2 = 40$ °C

$$\Delta\theta_C = \theta_2 - \theta_1 = 40 - 25 \Rightarrow \boxed{\Delta\theta_C = 15\ °C}$$ (aumento de temperatura)

2ª hipótese — A temperatura mínima ocorreu **depois** da máxima.

Então: $\theta_1 = 40$ °C e $\theta_2 = 25$ °C

$$\Delta\theta_C = \theta_2 - \theta_1 = 25 - 40 \Rightarrow \boxed{\Delta\theta_C = -15\ °C}$$ (diminuição de temperatura)

b) A variação expressa na escala Fahrenheit, no caso de aumento de temperatura, será dada por:

$$\frac{\Delta\theta_F}{9} = \frac{\Delta\theta_C}{5} \Rightarrow \frac{\Delta\theta_F}{9} = \frac{15}{5} \Rightarrow \boxed{\Delta\theta_F = 27\ °F}$$

No caso de diminuição de temperatura: $\boxed{\Delta\theta_F = -27\ °F}$

Respostas: a) 15 °C ou −15 °C; b) 27 °F ou −27 °F

R. 6 Existe a possibilidade de as variações de temperatura nas escalas Celsius e Fahrenheit serem expressas pelo mesmo valor numérico?

Solução:

Se fizermos, na fórmula de conversão entre as variações de temperatura, $\Delta\theta_F = \Delta\theta_C = X$, obteremos:

$$\frac{\Delta\theta_C}{5} = \frac{\Delta\theta_F}{9} \Rightarrow \frac{X}{5} = \frac{X}{9} \Rightarrow 9X = 5X$$

Assim, essa igualdade só é válida para $X = 0$. Portanto, só há coincidência entre os valores numéricos das variações de temperatura nas escalas Celsius e Fahrenheit quando $\boxed{\Delta\theta_C = 0\ °C}$ e $\boxed{\Delta\theta_F = 0\ °F}$, isto é, quando a temperatura final é igual à temperatura inicial.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 7 Em certa região da Terra, a temperatura máxima registrada no decorrer de um ano foi de 42 °C e a mínima foi de 17 °C. Determine:

a) a variação de temperatura entre os instantes em que essas temperaturas foram registradas;

b) o valor dessa variação de temperatura expresso em graus Fahrenheit.

P. 8 Um sistema inicialmente na temperatura de 20 °C sofre uma variação de −35 °C. Determine:

a) a temperatura final do sistema na escala Celsius;

b) a variação de temperatura do sistema expressa na escala Fahrenheit;

c) a temperatura final do sistema na escala Fahrenheit.

3 Função termométrica

Existem vários tipos de termômetros, diferindo uns dos outros pela grandeza termométrica. Por exemplo, nos termômetros de líquido, como os de mercúrio, a grandeza termométrica é o volume do líquido, que, ao variar, faz mudar a altura da coluna.

Nos termômetros de gás, a grandeza termométrica é o volume do gás (quando a pressão é mantida constante) ou a pressão do gás (quando o volume é mantido constante). No termômetro de resistência de platina, a grandeza termométrica é a resistência elétrica, que é estudada em Eletricidade, no Volume 3.

A fórmula que relaciona os valores da grandeza termométrica com os respectivos valores da temperatura é denominada **função termométrica**, que geralmente é do primeiro grau.

No termômetro de platina, a grandeza termométrica é a resistência elétrica.

Outros tipos de termômetro

O termômetro de mercúrio ainda é de uso muito difundido, pela facilidade de construção e de manuseio aliada a uma boa precisão. Por isso, em laboratórios (nas situações em que não se exige um rigor muito grande nas medições) e nas residências (para medir a temperatura corporal ou para uso culinário), o termômetro de mercúrio é normalmente o escolhido.

Existem, entretanto, vários outros tipos de termômetro. Entre os mais simples estão o termômetro de álcool (**1**), em que o líquido termométrico é álcool com corante, e o termômetro metálico (**2**), baseado na dilatação de uma lâmina bimetálica. Dentre os mais sofisticados, destacam-se os chamados termômetros digitais (**3**), geralmente baseados na variação da resistência elétrica de um condutor metálico em função da temperatura.

Diferentes aplicações demandam diferentes tipos de termômetro, cada um com sua própria grandeza termométrica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 7 Num termômetro de mercúrio, a coluna líquida apresenta 0,4 cm quando em presença do gelo em fusão (0 °C) e 20,4 cm em presença de vapores de água em ebulição (100 °C). Determine:

a) a função termométrica desse termômetro na escala Celsius;

b) a temperatura indicada por esse termômetro quando sua coluna líquida apresenta 8,4 cm de altura.

Solução:

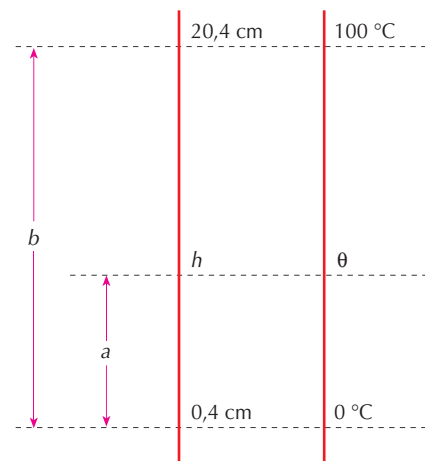
a) A função termométrica adotada é do primeiro grau. Assim, podemos fazer a comparação entre a grandeza termométrica (h) e a temperatura (θ):

$$\frac{a}{b} = \frac{h - 0{,}4}{20{,}4 - 0{,}4} = \frac{\theta - 0}{100 - 0}$$

$$\frac{h - 0{,}4}{20} = \frac{\theta}{100}$$

$$h - 0{,}4 = \frac{\theta}{5}$$

$$\boxed{\theta = 5h - 2}$$

Essa equação expressa a função termométrica desse termômetro na escala Celsius.

b) Substituindo na fórmula acima h = 8,4 cm, obtemos:

$$\theta = 5 \cdot 8{,}4 - 2 = 42 - 2 \Rightarrow \boxed{\theta = 40\ °C}$$

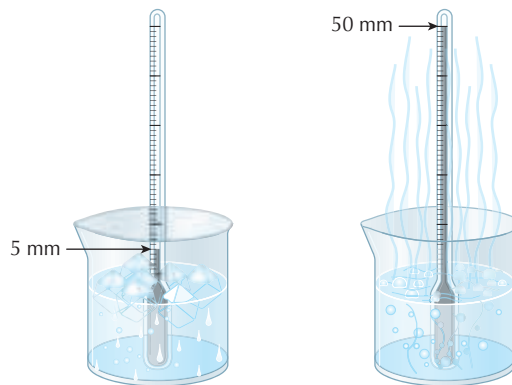
Respostas: a) $\theta = 5h - 2$; b) 40 °C

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 9 A coluna líquida de um termômetro de mercúrio apresenta altura de 5 mm quando o termômetro é colocado num recipiente contendo gelo em fusão. Quando o termômetro é colocado em vapores de água em ebulição sob pressão normal, a coluna líquida apresenta 50 mm.

Determine:

a) a função termométrica desse termômetro na escala Celsius;

b) a temperatura de um corpo em presença do qual a coluna líquida apresenta 15 mm de altura.

P. 10 No termômetro de gás, a volume constante, a grandeza termométrica é a pressão que o gás exerce. Um termômetro nessas condições indica uma pressão de 5 mmHg quando em equilíbrio com o ponto do gelo, e uma pressão de 7 mmHg no equilíbrio térmico com o ponto do vapor.

a) Estabeleça a função termométrica desse termômetro para a escala Fahrenheit.

b) Determine a temperatura de um forno sabendo que a pressão do gás no equilíbrio térmico é 9,5 mmHg.

Seção 2.3

A temperatura como medida da agitação térmica. A escala absoluta Kelvin

Objetivos

- Compreender os princípios da criação da escala Kelvin.
- Relacionar a temperatura na escala Kelvin com a temperatura na escala Celsius.
- Converter as variações de temperatura medidas nas escalas Celsius e Kelvin.

Termos e conceitos

- zero absoluto
- energia do ponto zero

As partículas constituintes de um gás estão em movimento desordenado. Esse movimento é denominado **agitação térmica**. Assim, cada partícula constituinte do gás é dotada de energia cinética própria. A soma das energias cinéticas individuais de todas as partículas constitui a **energia térmica** do gás.

Quanto mais intensa a agitação térmica, maior será a energia cinética de cada molécula e, em consequência, maior a temperatura (**fig. 8**).

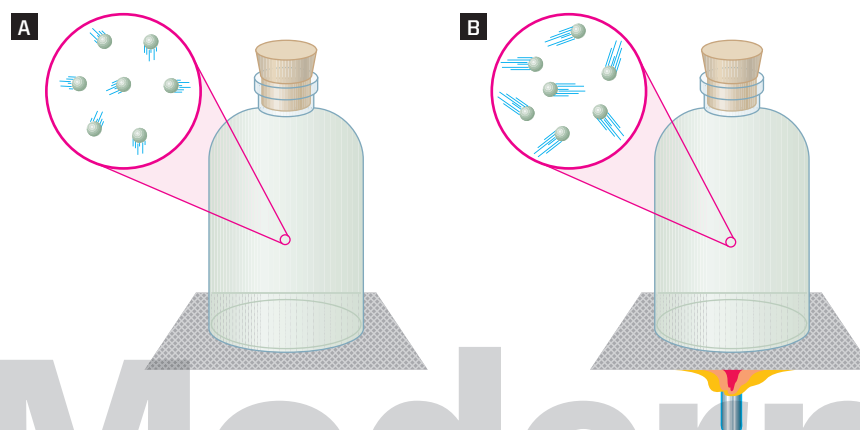



Figura 8. Ao se aquecer o gás, suas moléculas se agitam mais intensamente. Na situação (B), a temperatura é maior que na situação (A).

O fato de haver um número maior ou menor de moléculas altera a energia térmica total do corpo; no entanto, se cada molécula continua com a mesma energia cinética média que possuía, o grau de agitação é o mesmo e, consequentemente, a temperatura também é a mesma.

Imaginemos, por exemplo, um recipiente *A* contendo um gás, no qual cada molécula tem uma energia cinética média de $4 \cdot 10^{-21}$ J (**fig. 9A**). Se o ligarmos a um recipiente *B* (**fig. 9B**) com o mesmo número de moléculas, tendo cada uma delas os mesmos $4 \cdot 10^{-21}$ J de energia cinética média, a energia térmica total do sistema formado será maior, mas a temperatura não irá se alterar.

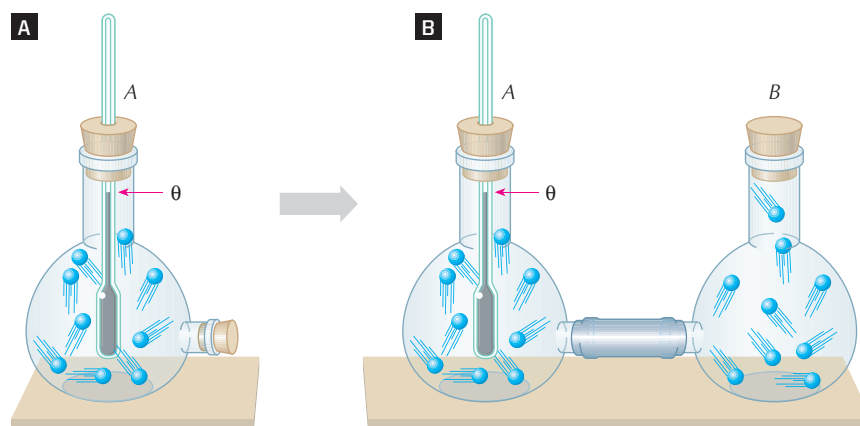



Figura 9. O sistema (*A* + *B*) possui maior energia térmica que o sistema *A*, mas a temperatura é a mesma.

No Capítulo 8 (*Estudo dos gases*) voltaremos a discutir a relação entre temperatura e agitação térmica. Por ora, podemos concluir:

A temperatura pode ser entendida como uma medida do nível energético de um sistema. Dois corpos podem apresentar temperaturas iguais (mesmo nível energético), mas possuir energias térmicas totais diferentes.

Experimentalmente, o físico irlandês William Thomson (lorde Kelvin*) verificou que a pressão de um gás rarefeito diminuía $\frac{1}{273{,}15}$ do valor inicial, quando resfriado a volume constante, de 0 °C para −1 °C. Por extrapolação, concluiu que, se o gás não mudasse de estado, sua pressão seria nula na temperatura de −273,15 °C (que se costuma aproximar para −273 °C).

Retrato de William Thomson, lorde Kelvin.

A esse estado térmico, em que se anularia a pressão do gás, foi dado o nome de **zero absoluto** — o limite inferior de temperatura. Todas as tentativas para alcançar o zero absoluto falharam. Ele é inatingível, embora seja possível aproximar-se dele indefinidamente. À medida que a temperatura de um corpo se aproxima do zero absoluto, a energia cinética de suas moléculas tende para um valor finito que se denomina **energia do ponto zero** — que, apesar do nome, **não é nula**.

Com base nesse estado térmico, lorde Kelvin estabeleceu, em 1848, a escala absoluta que hoje leva o seu nome. A origem (zero) da escala Kelvin é o zero absoluto e a unidade adotada é o **kelvin**** (símbolo **K**), cuja extensão é igual à do grau Celsius (°C). Assim, uma variação de temperatura de 1 °C corresponde a uma variação de temperatura de 1 K.

Generalizando, qualquer variação de temperatura na escala Celsius ($\Delta\theta_C$) é numericamente igual à variação de temperatura correspondente na escala Kelvin (ΔT):

$$\Delta\theta_C = \Delta T$$

Observe que as indicações que se correspondem nas escalas Celsius (θ_C) e Kelvin (T) nunca coincidem. Realmente, o ponto de congelamento da água (0 °C) corresponde a 273 K (que se lê 273 kelvins) e o ponto de ebulição da água (100 °C) corresponde a 373 K. Assim, comparando as indicações da escala Celsius e da escala absoluta Kelvin, para um mesmo estado térmico (**fig. 10**), notamos que a temperatura absoluta (T) é sempre 273 unidades mais alta que a correspondente temperatura Celsius (θ_C).

$$T = \theta_C + 273$$

Figura 10. A temperatura absoluta T é igual à temperatura Celsius θ_C somada a 273.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/cero/cero.htm (acesso em julho/2009), você poderá simular uma experiência na qual certo volume de ar é aquecido desde 0 °C até 100 °C. A variação de pressão do ar é analisada graficamente, verificando-se por extrapolação que se anula no zero absoluto (−273 °C).

* **LORDE KELVIN** é o título de nobreza que o célebre físico irlandês William Thomson (1824-1907) recebeu em 1892 da rainha Vitória. Aos 34 anos, ao instalar o primeiro cabo telegráfico sob o Oceano Atlântico, foi sagrado cavaleiro, recebendo o título de *Sir*. Ao morrer, foi enterrado ao lado da sepultura de Newton, na Abadia de Westminster, Londres.

** A unidade de temperatura termodinâmica (absoluta) do Sistema Internacional de Unidades é o kelvin (K), não se utilizando mais o grau Kelvin (°K) como era feito antigamente.

Temperaturas absolutas notáveis

Apresentamos, a seguir, algumas temperaturas notáveis, expressas em kelvin, desde o interior das estrelas mais quentes até o zero absoluto, que representam os dois extremos conhecidos.

Interior das estrelas mais quentes	10^9 K
Bomba de hidrogênio	10^8 K
Interior do Sol	10^7 K
Coroa solar	10^6 K
Bomba atômica	$3 \cdot 10^5$ K
Temperatura em que todas as moléculas estão ionizadas	$1{,}5 \cdot 10^4$ K
Superfície do Sol	$6 \cdot 10^3$ K
Filamento de lâmpada incandescente	$3 \cdot 10^3$ K
Chama de fogão	$1{,}1 \cdot 10^3$ K

Turbina a vapor	$9 \cdot 10^2$ K
Temperaturas familiares ao homem	273 K a 373 K
Oxigênio vaporiza-se sob pressão normal	90 K
Superfície de Plutão	entre 38 K e 63 K
Hidrogênio vaporiza-se sob pressão normal	20 K
Hélio vaporiza-se sob pressão normal	4 K
Hélio solidifica-se sob alta pressão	1 K
Zero absoluto	0 K

Está no *Guinness*

De acordo com o *Guinness* 2008, o livro dos recordes, a temperatura mais baixa até hoje conseguida foi de $450 \cdot 10^{-12}$ K. Essa temperatura foi obtida por uma equipe do MIT, liderada por Aaron Leanhardt, em Cambridge, Massachusetts, EUA.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *Criogenia – A Física das baixas temperaturas*

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 8 A temperatura corporal humana pode variar entre 35 °C e 42 °C na escala Celsius.

a) Determine os valores desses limites na escala absoluta Kelvin.

b) Calcule a variação quando a temperatura de uma pessoa se altera do menor para o maior dos valores citados acima, nas duas escalas.

Solução:

a) A indicação absoluta é 273 unidades maior que a indicação Celsius: $T = \theta_C + 273$. Assim:

$$\theta_C = 35\ °C \Rightarrow T = 35 + 273 \Rightarrow \boxed{T = 308\ K}$$

$$\theta'_C = 42\ °C \Rightarrow T' = 42 + 273 \Rightarrow \boxed{T' = 315\ K}$$

b) Na escala Celsius: $\theta_1 = 35\ °C$ e $\Delta_2 = 42\ °C$. Assim:

$$\Delta\theta_C = \theta_2 - \theta_1 = 42 - 35 \Rightarrow \boxed{\Delta\theta_C = 7\ °C}$$

Na escala Kelvin: $T_1 = 308$ K e $T_2 = 315$ K. Então:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 315 - 308 \Rightarrow \boxed{\Delta T = 7\ K}$$

Observe que as variações de temperatura coincidem nas duas escalas:

$$\boxed{\Delta\theta_C = \Delta T}$$

Respostas: a) A temperatura corporal na escala Kelvin varia entre 308 K e 315 K; b) 7 °C e 7 K

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 11 O álcool etílico tem ponto de congelamento de −39 °C sob pressão normal. Determine essa temperatura na escala Kelvin.

P. 12 (FICB-DF) Quando um termômetro graduado na escala Celsius sofrer uma variação de 32 graus em sua temperatura, qual será a correspondente variação de temperatura para um termômetro graduado na escala Kelvin?

P. 13 Em certa cidade, num dia de verão, a temperatura mínima foi de 22 °C, e a máxima, de 33 °C. Determine:

a) os valores das temperaturas mínima e máxima referidas expressos na escala absoluta Kelvin;

b) a máxima variação de temperatura ocorrida nesse dia, expressa nas escalas Celsius e Kelvin.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 14 (PUC-SP) Um médico inglês mede a temperatura de um paciente com suspeita de infecção e obtém em seu termômetro clínico o valor de 102,2 °F (graus Fahrenheit).

a) Tem ele motivo de preocupação com o paciente? Justifique.

b) Por que um doente com febre sente frio? Responda e defina também o conceito físico de calor.

P. 15 Uma escala arbitrária adota para o ponto do gelo e para o ponto do vapor, respectivamente, os valores −10 e 240. Estabeleça as fórmulas de conversão dessa escala para as escalas Celsius e Fahrenheit. Determine a indicação da referida escala para o zero absoluto.

P. 16 Numa escala arbitrária E, o zero corresponde a −10 °C e a indicação 100 °E corresponde a 40 °C. Determine:

a) a fórmula de conversão entre as indicações da escala E e da escala Celsius;

b) as leituras que, na escala E, correspondem ao ponto do gelo e ao ponto do vapor;

c) as indicações cujos valores absolutos coincidem nas escalas E e Celsius.

P. 17 (Olimpíada Brasileira de Física) Ao se construir uma escala termométrica arbitrária X, verificou-se que a temperatura de −40 °X coincide com o mesmo valor na antiga escala de temperatura Réaumur, que adota respectivamente 0 °R e 80 °R para os pontos fixos fundamentais (ponto do gelo e ponto do vapor). Verificou-se ainda que a temperatura de −75 °X coincide com o mesmo valor na escala Celsius. Determine na escala X as leituras correspondentes a 0 °C e a 80 °R.

P. 18 Um termômetro de escala Celsius tornou-se inexato, conservando, entretanto, seção interna uniforme. Quando as temperaturas são 0 °C e 70 °C, ele marca, respectivamente, −2° e 71°. Determine uma fórmula que forneça as temperaturas exatas T em função das que se leem no termômetro defeituoso D. Quais das temperaturas lidas coincidem em valor absoluto?

P. 19 (EEM-SP) Pode-se medir a temperatura com um termômetro de mercúrio. Neste, a grandeza termométrica é o comprimento L de uma coluna capilar, medida a partir de uma origem comum. Verifica-se que $L = 2{,}34$ cm, quando o termômetro está em equilíbrio térmico com o gelo em fusão, e $L = 12{,}34$ cm, quando o equilíbrio térmico é com a água em ebulição (num ambiente em que a pressão atmosférica é 1 atm).

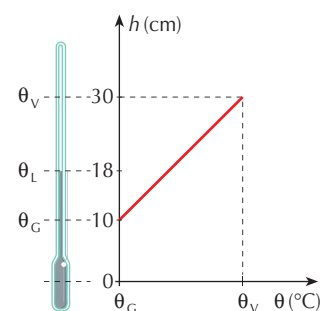
a) Calcule o comprimento da coluna de mercúrio quando a temperatura é $\theta = 25$ °C.

b) Calcule a temperatura do ambiente quando $L = 8{,}84$ cm.

P. 20 (UFRJ) Em uma escala termométrica, que chamaremos de escala médica, o grau é chamado de **grau médico** e representado por °M. A escala médica é definida por dois procedimentos básicos: no primeiro, faz-se corresponder 0 °M a 36 °C e 100 °M a 44 °C; no segundo, obtém-se uma unidade de °M pela divisão do intervalo de 0 °M a 100 °M em 100 partes iguais.

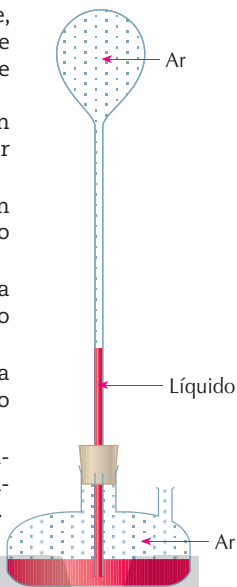
a) Calcule a variação em graus médicos que corresponde à variação de 1 °C.

b) Calcule, em graus médicos, a temperatura de um paciente que apresenta uma febre de 40 °C.

P. 21 (Cesgranrio-RJ) Com o objetivo de recalibrar um velho termômetro com a escala totalmente apagada, um estudante o coloca em equilíbrio térmico, primeiro com gelo fundente e, depois, com água em ebulição sob pressão atmosférica normal. Em cada caso, ele anota a altura atingida pela coluna de mercúrio: 10,0 cm e 30,0 cm, respectivamente, medida sempre a partir do centro do bulbo. Em seguida, ele espera que o termômetro entre em equilíbrio térmico com o laboratório e verifica que, nessa situação, a altura da coluna de mercúrio é de 18,0 cm.
Qual é a temperatura do laboratório na escala Celsius desse termômetro?

TESTES PROPOSTOS

T.13 (Unifesp) A figura reproduz uma gravura do termoscópio de Galileu, um termômetro primitivo por ele construído no início do século XVII. No termoscópio, o ar é aprisionado no bulbo superior, ligado por um tubo a um recipiente aberto contendo um líquido colorido.

Assim, pode-se concluir que, se a temperatura ambiente subir, a altura da coluna de líquido colorido:

a) aumenta, pois aumentam o volume e a pressão do ar contido no bulbo.
b) diminui, pois aumentam o volume e a pressão do ar contido no bulbo.
c) aumenta, em decorrência da dilatação do líquido contido no recipiente.
d) diminui, em decorrência da dilatação do líquido contido no recipiente.
e) pode aumentar ou diminuir, dependendo do líquido contido no recipiente.

T.14 (Olimpíada Paulista de Física) Uma empresa brasileira do setor de alimentos deseja exportar sua massa para bolos. A legislação vigente no país importador exige que as temperaturas sejam expressas na escala Fahrenheit. Se o forno para assar o bolo deve ser preaquecido a uma temperatura de 150 °C, qual é o valor correspondente na escala Fahrenheit?
a) 151 °F
b) 202 °F
c) 253 °F
d) 302 °F
e) 212 °F

T.15 (Mackenzie-SP) No dia 1º de janeiro de 1997, Chicago amanheceu com a temperatura de 5 °F. Essa temperatura, na escala Celsius, corresponde a:
a) −15 °C
b) −10 °C
c) −5 °C
d) 2 °C
e) 8 °C

T.16 (Fuvest-SP) A televisão noticia que a temperatura em Nova York chegou aos 104 graus (naturalmente 104 graus Fahrenheit). Converta para graus Celsius.
a) 44 °C
b) 40 °C
c) 36 °C
d) 30 °C
e) 0 °C

T.17 (FMTM-MG) A fim de diminuir o risco de explosão durante um incêndio, os botijões de gás possuem um pequeno pino com aspecto de parafuso, conhecido como **plugue fusível**. Uma vez que a temperatura do botijão chegue a 172 °F, a liga metálica desse dispositivo de segurança se funde, permitindo que o gás escape. Em termos de nossa escala habitual, o derretimento do plugue fusível ocorre, aproximadamente, a:
a) 69 °C
b) 78 °C
c) 85 °C
d) 96 °C
e) 101 °C

T.18 (Unimep-SP) Mergulham-se dois termômetros na água: um graduado na escala Celsius e o outro na Fahrenheit. Espera-se o equilíbrio térmico e nota-se que a diferença entre as leituras nos dois termômetros é igual a 92. A temperatura da água valerá, portanto:
a) 28 °C e 120 °F
b) 32 °C e 124 °F
c) 60 °C e 152 °F
d) 75 °C e 167 °F
e) 80 °C e 172 °F

T.19 (UEPG-PR) Em um recipiente contendo água, dois termômetros medem, simultaneamente, a temperatura. Um dos termômetros está graduado na escala Fahrenheit e o outro na escala Celsius, e a diferença entre a medida obtida na escala Fahrenheit e a medida obtida na escala Celsius é igual a 100°. A partir desses dados, é correto afirmar que a água encontra-se a uma temperatura igual a:
a) 45 °C
b) 185 °C
c) 85 °C
d) 95 °C
e) 75 °C

T.20 (Mackenzie-SP) Um viajante, ao desembarcar no aeroporto de Londres, observou que o valor da temperatura do ambiente na escala Fahrenheit é o quíntuplo do valor da temperatura na escala Celsius. Esta temperatura é de:
a) 5 °C
b) 10 °C
c) 15 °C
d) 20 °C
e) 25 °C

T.21 (UFF-RJ) Um turista brasileiro, ao desembarcar no aeroporto de Chicago, observou que o valor da temperatura lá indicado, em °F, era um quinto do valor correspondente em °C. O valor observado foi:
a) −2 °F
b) 2 °F
c) 4 °F
d) 0 °F
e) −4 °F

T.22 (Mackenzie-SP) A indicação de uma temperatura na escala Fahrenheit excede em 2 unidades o dobro da correspondente indicação na escala Celsius. Essa temperatura é:
a) 300 °C
b) 170 °C
c) 150 °C
d) 100 °C
e) 50 °C

T.23 (FEI-SP) Uma diferença de temperatura de 100 °C equivale a:
a) 112 °F
b) 212 °F
c) 180 °F
d) 132 °F
e) 68 °F

T.24 (Ufac) A temperatura em Rio Branco, em certo dia, sofreu uma variação de 15 °C. Na escala Fahrenheit, essa variação corresponde a:
a) 108 °F
b) 71 °F
c) 44 °F
d) 27 °F
e) 1 °F

V2_P1_UN_B_CAP_02.indd 38 22.08.09 14:18:50

T. 25 (ITA-SP) Para medir a febre de pacientes, um estudante de medicina criou sua própria escala linear de temperaturas. Nessa nova escala, os valores de 0 (zero) e 10 (dez) correspondem respectivamente a 37 °C e 40 °C. A temperatura de mesmo valor numérico em ambas as escalas é aproximadamente:

a) 52,9 °C
b) 28,5 °C
c) 74,3 °C
d) −8,5 °C
e) −28,5 °C

T. 26 (Mackenzie-SP) Um termômetro mal graduado na escala Celsius indica para a água, à pressão normal, o valor de 1 °C para a fusão e o de 99 °C para a ebulição. A única temperatura correta que esse termômeto poderá indicar é a de:

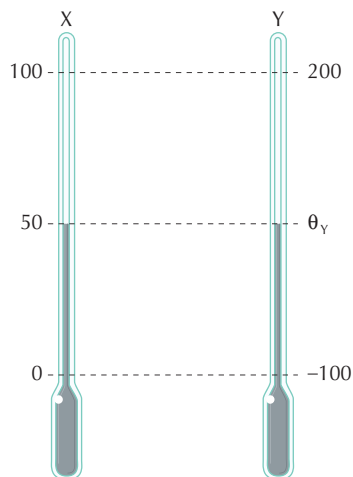
a) 45 °C
b) 47 °C
c) 50 °C
d) 53 °C
e) 55 °C

T. 27 (UFS-SE) A equação de conversão de uma escala X para a escala Celsius é dada pela expressão $\theta_X = \frac{5}{4}\theta_C - 20$, onde θ_X é a temperatura em graus X e θ_C a temperatura em graus Celsius. Pode-se afirmar que os pontos fixos da escala X correspondentes à fusão do gelo e à ebulição da água sob pressão normal são, respectivamente:

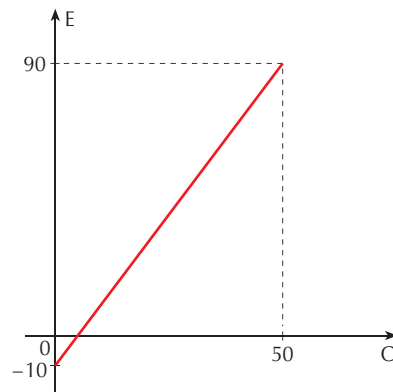
a) −20 °X e 105 °X
b) −20 °X e 125 °X
c) 0 °X e 95 °X
d) 10 °X e 105 °X
e) 20 °X e 125 °X

T. 28 (Ufam) Uma escala termométrica X é construída de modo que a temperatura de 0 °X corresponde a −4 °F, e a temperatura de 100 °X corresponde a 68 °F. Nesta escala X, a temperatura de fusão do gelo vale:

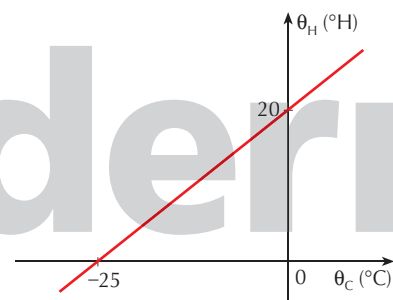
a) 30 °X
b) 20 °X
c) 50 °X
d) 40 °X
e) 10 °X

T. 29 (PUC-RS) Duas escalas termométricas quaisquer, X e Y, relacionam-se conforme o diagrama seguinte.

O valor θ_Y na escala Y que corresponde a 50 graus na escala X é:

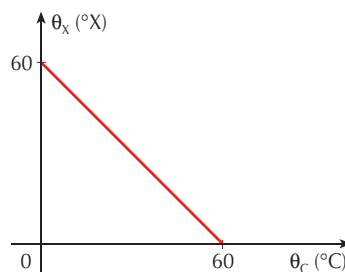
a) −50
b) 0
c) 50
d) 100
e) 150

T. 30 (Uece) Comparando-se a escala E de um termômetro com a escala C (Celsius), obteve-se este gráfico de correspondência entre as medidas:

Quando o termômetro Celsius estiver registrando 90 °C, o termômetro E estará marcando:

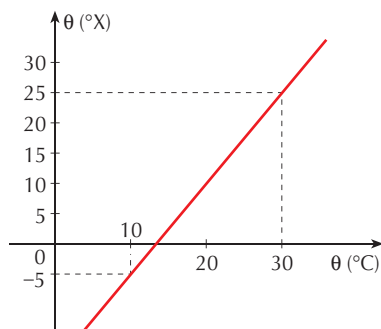
a) 100 °E
b) 120 °E
c) 150 °E
d) 170 °E
e) 200 °E

T. 31 (Uema) O gráfico estabelece a relação entre uma escala termométrica hipotética de temperatura e a escala Celsius.

A temperatura da água em ebulição, nessa escala hipotética, vale:

a) 60 °H
b) 100 °H
c) 80 °H
d) 120 °H
e) 125 °H

T. 32 (Unifor-CE) O gráfico representa a relação entre uma escala de temperatura arbitrária X e a escala Celsius.

Na escala X, ao nível do mar, a temperatura de fusão do gelo e a de ebulição da água valem, respectivamente:

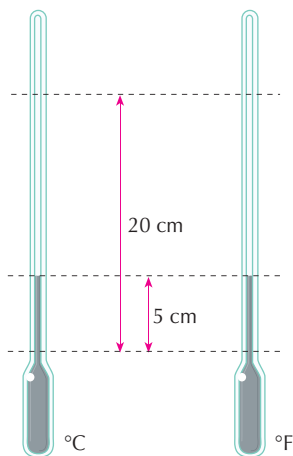
a) 100 e 0
b) 60 e 40
c) 60 e −40
d) 0 e 100
e) −40 e 60

T. 33 (UEL-PR) O gráfico a seguir representa a relação entre a temperatura medida numa escala X e a mesma temperatura medida na escala Celsius.

Pelo gráfico, pode-se concluir que o intervalo de temperatura de 1,0 °C é equivalente a:

a) 0,50 °X
b) 0,80 °X
c) 1,0 °X
d) 1,5 °X
e) 2,0 °X

T. 34 (Mackenzie-SP) Um profissional, necessitando efetuar uma medida de temperatura, utilizou um termômetro cujas escalas termométricas inicialmente impressas ao lado da coluna de mercúrio estavam ilegíveis. Para atingir seu objetivo, colocou o termômetro inicialmente numa vasilha com gelo fundente, sob pressão normal, e verificou que no equilíbrio térmico a coluna de mercúrio atingiu 8,0 cm. Ao colocar o termômetro em contato com água fervente, também sob pressão normal, o equilíbrio térmico se deu com a coluna de mercúrio atingindo 20,0 cm de altura. Se nesse termômetro utilizarmos as escalas Celsius e Fahrenheit e a temperatura a ser medida for expressa pelo mesmo valor nas duas escalas, a coluna de mercúrio terá altura de:

a) 0,33 cm
b) 0,80 cm
c) 3,2 cm
d) 4,0 cm
e) 6,0 cm

T. 35 (UFBA) As indicações para os pontos de fusão do gelo e de ebulição da água sob pressão normal de dois termômetros, um na escala Celsius e outro na escala Fahrenheit, distam 20 cm, conforme a figura.

A 5 cm do ponto de fusão do gelo os termômetros registram temperaturas iguais a:

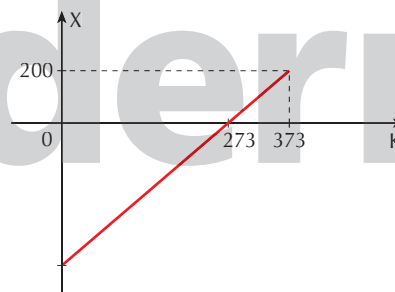
a) 25 °C e 77 °F
b) 20 °C e 40 °F
c) 20 °C e 45 °F
d) 25 °C e 45 °F
e) 25 °C e 53 °F

T. 36 (Uneb-BA) Numa cidade onde a pressão atmosférica vale 1 atm, a coluna de mercúrio de um termômetro apresenta altura de 4 cm, quando em equilíbrio térmico com gelo em fusão, e possui altura de 14 cm, quando em equilíbrio térmico com água em ebulição. A altura da coluna de mercúrio quando a indicação do termômetro é de 30 °C é, em cm:

a) 3 b) 4 c) 7 d) 11 e) 17

T. 37 (Mackenzie-SP) O célebre físico irlandês William Thomson, que ficou mundialmente conhecido pelo título de lorde Kelvin, entre tantos trabalhos que desenvolveu, "criou" a escala termométrica absoluta. Essa escala, conhecida por escala Kelvin, consequentemente não admite valores negativos, e, para tanto, estabeleceu como zero o estado de mínima energia molecular. Conceitualmente sua colocação é consistente, pois a temperatura de um corpo se refere à medida:

a) da quantidade de movimento das moléculas do corpo.
b) da quantidade de calor do corpo.
c) da energia térmica associada ao corpo.
d) da energia cinética das moléculas do corpo.
e) do grau de agitação das moléculas do corpo.

T. 38 (Unirio-RJ) O nitrogênio, à pressão de 1,0 atm, se condensa a uma temperatura de −392 graus numa escala termométrica X. O gráfico representa a correspondência entre essa escala e a escala K (Kelvin).

Em função dos dados apresentados no gráfico, podemos verificar que a temperatura de condensação do nitrogênio, em kelvin, é dada por:

a) 56
b) 77
c) 100
d) 200
e) 273

T. 39 (Mackenzie-SP) Para medir a temperatura de um certo corpo, utilizou-se um termômetro graduado na escala Fahrenheit e o valor obtido correspondeu a $\frac{4}{5}$ da indicação de um termômetro graduado na escala Celsius, para o mesmo estado térmico. Se a escala adotada tivesse sido a Kelvin, esta temperatura seria indicada por:

a) 305 K
b) 273 K
c) 241 K
d) 32 K
e) 25,6 K

T. 40 (UFPA) Em um certo instante a temperatura de um corpo, medida na escala Kelvin, foi de 300 K. Decorrido um certo tempo, mediu-se a temperatura desse mesmo corpo e o termômetro indicou 68 °F. A variação de temperatura sofrida pelo corpo, medida na escala Celsius, foi de:

a) −32 °C
b) −5 °C
c) −7 °C
d) −12 °C
e) 368 °C

UNIDADE B

Capítulo 3

Dilatação térmica de sólidos e líquidos

Na construção civil o fenômeno da dilatação térmica tem grande importância e deve ser levado em consideração, por exemplo, no planejamento de pontes, viadutos e vias férreas. As juntas de dilatação são responsáveis por minimizar os efeitos da dilatação em situações como a mostrada na imagem.

A mudança nas dimensões dos corpos, quando sofrem variações de temperatura, é um fenômeno que pode ser facilmente observado em situações do cotidiano. Quando observamos a coluna de mercúrio de um termômetro clínico se expandir ao entrar em contato com uma pessoa com febre, estamos observando a ocorrência da dilatação térmica dos materiais.

3.1 Introdução

A variação da temperatura geralmente acarreta, nos sólidos e nos líquidos, mudanças nas suas dimensões.

3.2 Dilatação dos sólidos

A variação das dimensões de um sólido depende da variação da temperatura, de suas dimensões iniciais e do material que o constitui.

3.3 Dilatação térmica dos líquidos

Para analisarmos a dilatação de um líquido precisamos conhecer a dilatação do recipiente que o contém.

Seção 3.1

Introdução

Objetivos

- Analisar o aspecto microscópico da variação das dimensões de um corpo quando varia sua temperatura.
- Caracterizar as dilatações linear, superficial e volumétrica para os sólidos.

Termos e conceitos

- dilatação térmica
- contração térmica
- dilatação linear
- dilatação superficial
- dilatação volumétrica

Após o estudo da temperatura e de sua medida, feito no capítulo anterior, passaremos agora a considerar um dos efeitos da temperatura: a **dilatação**.

Geralmente, quando a temperatura de um corpo aumenta, suas dimensões também aumentam. A esse fenômeno dá-se o nome de **dilatação térmica**. Quando diminuem as dimensões do corpo, em virtude da diminuição da temperatura, temos a **contração térmica**.

A dilatação de um corpo pelo aumento de temperatura é consequência do aumento da agitação das partículas constituintes do corpo — sejam elas átomos, moléculas ou íons, de acordo com o material. As colisões entre essas partículas tornam-se mais violentas após o aquecimento, o que causa uma separação maior entre elas.

Imaginemos uma experiência simples para evidenciar esse fato. Um termômetro de mercúrio é colocado no interior de um líquido. Se submetermos o líquido à chama de um bico de gás (**fig. 1**), o termômetro indicará um aumento da temperatura.

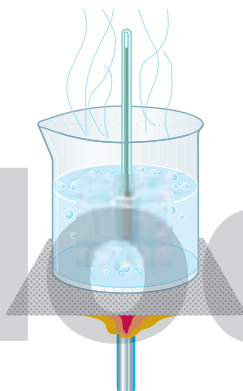



Figura 1. Em diversos instrumentos de medição, o fenômeno da dilatação térmica é utilizado como meio para obtenção de medidas de temperatura, como ocorre no termômetro de mercúrio.

A indicação do termômetro se faz da seguinte maneira: o líquido recebe calor da chama, aumentando a energia cinética de suas moléculas; essas moléculas golpeiam o vidro do bulbo do termômetro com maior frequência e mais violentamente; as partículas do vidro passam a vibrar mais intensamente e transmitem essa energia de vibração às partículas do mercúrio, também por meio de colisões; a energia cinética das partículas do mercúrio aumenta e, com isso, a distância média entre elas aumenta; desse modo, a coluna de mercúrio se dilata.

A dilatação da substância termométrica (neste caso, o álcool) constitui o princípio de funcionamento dos termômetros de coluna líquida.

A dilatação térmica é sempre **volumétrica** (**fig. 2C**), pois as moléculas afastam-se umas das outras em qualquer direção que se considere. Se analisarmos a dilatação em uma só direção (variação do comprimento de uma barra, variação do diâmetro de uma esfera, variação de uma aresta de um cubo), estaremos estudando a **dilatação linear** (**fig. 2A**). Ao analisar a dilatação de duas das dimensões (variação da área de uma placa, variação da área da face de um cubo), estaremos estudando a **dilatação superficial** (**fig. 2B**).

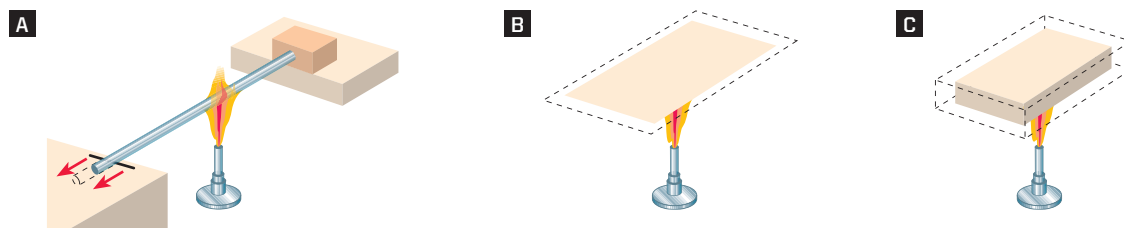



Figura 2. **(A) Dilatação linear. (B) Dilatação superficial. (C) Dilatação volumétrica.**

Então, por conveniência, faremos o estudo da dilatação dos sólidos da seguinte maneira:

- dilatação linear — aumento de uma das dimensões do corpo, como no caso do comprimento de uma barra (**fig. 2A**);
- dilatação superficial — aumento da área de uma superfície, como a de uma placa (**fig. 2B**);
- dilatação volumétrica — aumento do volume do corpo (**fig. 2C**).

No caso dos líquidos, por não terem forma própria e estarem contidos em recipientes sólidos, costumamos estudar apenas sua dilatação volumétrica.

Seção 3.2

Dilatação dos sólidos

Objetivos

- Avaliar a dilatação térmica de corpos sólidos utilizando as leis da dilatação linear, superficial e volumétrica.
- Definir dilatação relativa.
- Construir e analisar gráficos obtidos a partir da lei de dilatação linear.

Termos e conceitos

- **coeficiente de dilatação linear**
- **grau Celsius recíproco**
- **coeficiente de dilatação superficial**
- **coeficiente de dilatação volumétrica**

1 Dilatação linear

Quando aumentamos de 10 °C a temperatura de uma barra de ferro com 100 cm de comprimento, essa dimensão aumenta de 0,012 cm (**fig. 3A**). Submetida ao mesmo aquecimento, uma barra de ferro com o dobro do comprimento (200 cm) tem sua dimensão aumentada de 0,024 cm, ou seja, sofre uma dilatação igual ao dobro da anterior (**fig. 3B**).

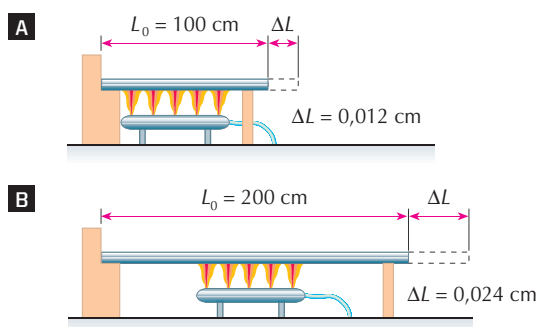



Figura 3. **Influência do comprimento inicial na dilatação.**

Para uma barra com outro comprimento inicial, a mesma elevação de temperatura acarretará uma outra dilatação, proporcional ao comprimento inicial dessa barra.

A variação de comprimento ΔL de uma barra que sofre aquecimento é diretamente proporcional ao seu comprimento inicial L_0.

Voltando ao exemplo da barra de ferro, de comprimento inicial $L_0 = 100$ cm, a elevação de 10 °C na temperatura produz uma dilatação de 0,012 cm (**fig. 4A**). Uma elevação de temperatura duas vezes maior (20 °C) faz o comprimento da barra aumentar de 0,024 cm, isto é, acarreta uma dilatação igual ao dobro da anterior (**fig. 4B**).

A

B

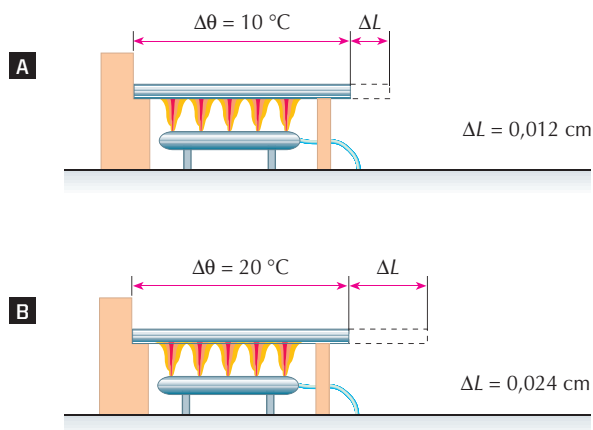



Figura 4. **Influência da variação de temperatura na dilatação.**

> A variação de comprimento ΔL de uma barra que sofre aquecimento é diretamente proporcional à variação de temperatura $\Delta\theta$.

Repetindo as experiências com barras de materiais diferentes, observamos o mesmo comportamento, mas a dilatação é específica para cada caso.

> A variação de comprimento ΔL de uma barra que sofre aquecimento depende do material que a constitui.

Tendo em vista que a dilatação ΔL de uma barra é diretamente proporcional ao comprimento inicial L_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$, temos:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa fórmula, α é uma constante de proporcionalidade denominada **coeficiente de dilatação linear**, característico de cada material. Essa fórmula expressa, algebricamente, a **lei da dilatação linear**.

Tomemos novamente o primeiro exemplo apresentado. O comprimento inicial é $L_0 = 100$ cm, a variação de temperatura é $\Delta\theta = 10$ °C e a dilatação (variação de comprimento) é $\Delta L = 0{,}012$ cm. O coeficiente de dilatação linear será dado por:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta} \Rightarrow \alpha = \frac{0{,}012 \text{ cm}}{100 \text{ cm} \cdot 10 \text{ °C}} \Rightarrow \alpha = 0{,}000012 \frac{\text{cm}}{\text{cm} \cdot \text{°C}}$$

O valor encontrado é o coeficiente de dilatação linear do ferro e tem o seguinte significado:

> Ocorre uma dilatação de 0,000012 cm para cada cm de comprimento da barra e para cada °C de variação de temperatura.

Assim, para o ferro, podemos escrever: $\alpha = 0{,}000012\ °C^{-1}$ ou $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$.

A unidade do coeficiente de dilatação é o inverso do grau Celsius, chamado **grau Celsius recíproco**, de símbolo **$°C^{-1}$**.

Na fórmula $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$, observe que, para o mesmo L_0 e o mesmo $\Delta\theta$, sofre maior dilatação ΔL o material de maior coeficiente de dilatação α. Os metais estão entre as substâncias que mais se dilatam, isto é, que apresentam maior coeficiente de dilatação. Outros materiais, como o vidro pirex, apresentam pequeno coeficiente de dilatação e, portanto, dilatação reduzida.

Para comparação, apresentamos alguns coeficientes de dilatação linear:

	Material	Coeficiente
Maior dilatação ↑	Chumbo:	$27 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Zinco:	$26 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Alumínio:	$22 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Prata:	$19 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Ouro:	$15 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Concreto:	$12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Vidro comum:	$9 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Granito:	$8 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
	Vidro pirex:	$3{,}2 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
Menor dilatação ↓	Porcelana:	$3 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

O vidro pirex é mais resistente a choques térmicos do que o vidro comum porque tem pequeno coeficiente de dilatação térmica.

O coeficiente de dilatação linear, como foi definido, corresponde a um valor médio entre a temperatura inicial e a temperatura final. É possível definir um coeficiente $\alpha = \dfrac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta}$ para dada temperatura pelo limite da expressão $\dfrac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta}$ quando o intervalo de temperatura $\Delta\theta$ tende a zero. Contudo, não sendo muito grande a variação de temperatura, o valor médio do coeficiente de dilatação praticamente coincide com o coeficiente em dada temperatura.

Outra fórmula para a dilatação linear é obtida substituindo-se ΔL por $(L - L_0)$, sendo L o comprimento final.

$$L - L_0 = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$$

$$\boxed{L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)}$$

Dilatação relativa

Chama-se **dilatação relativa** de um corpo a relação entre o valor da dilatação que esse corpo sofre e o valor inicial de suas dimensões. Essa relação pode ser dada porcentualmente, o que é bastante comum.

Assim, quando dizemos que o comprimento de uma barra aumentou de 0,5%, isso significa que a relação entre sua dilatação ΔL e seu volume inicial L_0 vale:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 0{,}5\% = \frac{0{,}5}{100} = 0{,}005$$

Com base na fórmula que expressa a lei da dilatação, poderíamos escrever, nesse caso:

$$\alpha \cdot \Delta\theta = \frac{0{,}5}{100} = 0{,}005$$

Observe que, conhecida a dilatação relativa e a variação de temperatura, podemos obter o coeficiente de dilatação do material que constitui a barra.

Gráficos da dilatação linear

Vamos imaginar uma experiência na qual uma barra de comprimento inicial L_0 é submetida, a partir de 0 °C, a temperaturas sucessivamente maiores, como, por exemplo, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, ... 50 °C. Se anotarmos o comprimento L da barra para cada temperatura e lançarmos no gráfico $L \times \theta$, obteremos uma curva que, para um intervalo pequeno de temperatura, pode ser considerada uma reta (**fig. 5**), valendo a fórmula $L = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$.

Como $\Delta\theta = (\theta - \theta_0)$, temos:

$$L = L_0 + [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)]$$

Se $\theta_0 = 0$ °C, vem:

$$L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \theta \quad \text{(função do primeiro grau)}$$

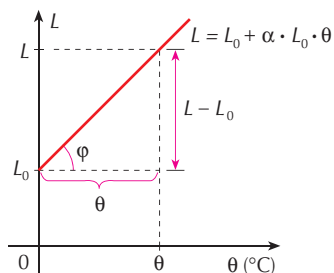



Figura 5. Gráfico da função $L = L_0 + \alpha \cdot L_0 \cdot \theta$.

No gráfico:

$$\text{tg } \varphi = \frac{L - L_0}{\theta} = \alpha \cdot L_0 \text{ (coeficiente angular da reta)}$$

De $\Delta L = \alpha \cdot L_0 (\theta - \theta_0)$, se $\theta_0 = 0$ °C, vem:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \theta \quad \text{(função linear)}$$

Seu gráfico é o da **figura 6**, no qual:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\Delta L}{\theta} = \alpha \cdot L_0 \text{ (coeficiente angular da reta)}$$

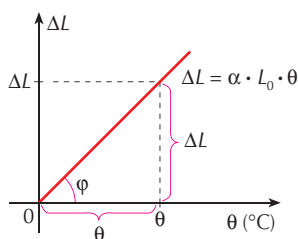
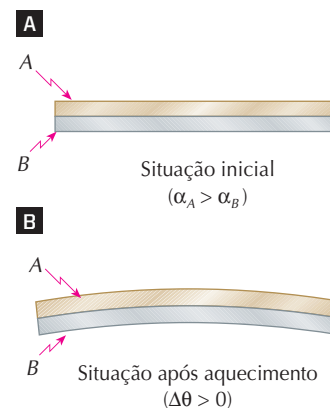



Figura 6. Gráfico da função $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \theta$.

O dilatômetro da figura destina-se à medição da dilatação linear de barras metálicas de diferentes materiais.

A lâmina bimetálica

A lâmina bimetálica é um dispositivo constituído por duas tiras justapostas e bem aderidas, feitas de metais com diferentes coeficientes de dilatação (**fig. A**). Ao serem aquecidas, as tiras se dilatam provocando o encurvamento da lâmina para o lado da tira de menor coeficiente de dilatação (**fig. B**).

Uma aplicação prática comum da lâmina bimetálica é o seu uso no chamado pisca-pisca. As fotos seguintes ilustram uma montagem simples em que uma lâmina bimetálica funciona como interruptor de um circuito, ligando-o e desligando-o continuamente. Partindo da situação em que a lâmpada está acesa (**foto 1**), a corrente elétrica, ao passar pela lâmina, determina o aquecimento desta. Com isso, a lâmina se encurva, abrindo o circuito (**foto 2**). Interrompida a corrente, a lâmina esfria, volta à posição inicial, fecha o circuito e novamente a lâmpada se acende (**foto 3**). A lâmina volta a se aquecer pela passagem da corrente, encurva-se e abre o circuito, repetindo-se o ciclo.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 9 Uma barra apresenta a 10 °C comprimento de 90 m, sendo feita de um material cujo coeficiente de dilatação linear médio vale $19 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. A barra é aquecida até 20 °C. Determine:

a) a dilatação ocorrida;

b) a dilatação relativa, expressa em porcentagem;

c) o comprimento final da barra.

Solução:

a) Pela lei da dilatação linear ($\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta\theta$), sendo dados $\alpha = 19 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}, $L_0 = 90$ m $= 9.000$ cm e $\Delta\theta = 20$ °C $- 10$ °C $= 10$ °C, resulta:

$$\Delta L = 19 \cdot 10^{-6} \cdot 9.000 \cdot 10 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta L = 171 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \boxed{\Delta L = 1{,}71 \text{ cm}}$$

b) A dilatação relativa é dada por:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1{,}71}{90} = 0{,}019 \Rightarrow \frac{\Delta L}{L_0} = 0{,}019 \cdot 100\% \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\Delta L}{L_0} = 1{,}9\%}$$

c) O comprimento final L vale:

$$L = L_0 + \Delta L \Rightarrow L = 9.000 + 1{,}71 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{L = 9.001{,}71 \text{ cm}}$$

Respostas: a) 1,71 cm; b) 1,9%; c) 9.001,71 cm

R. 10 Duas barras A e B de materiais diferentes apresentam, a 0 °C, comprimentos respectivamente iguais a 75,0 cm e 75,3 cm. A que temperatura devem ser aquecidas para que seus comprimentos se tornem iguais? Os coeficientes de dilatação linear dos materiais de A e B valem, respectivamente, $5{,}4 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1} e $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}.

Solução:

Pede-se a temperatura em que $L_A = L_B$. Mas:

$$L_A = L_{0_A} \cdot (1 + \alpha_A \cdot \Delta\theta) \text{ e } L_B = L_{0_B} \cdot (1 + \alpha_B \cdot \Delta\theta)$$

Logo:

$$L_{0_A} \cdot (1 + \alpha_A + \Delta\theta) = L_{0_B} \cdot (1 + \alpha_B \cdot \Delta\theta)$$

São dados:

$L_{0_A} = 75{,}0$ cm; $L_{0_B} = 75{,}3$ cm; $\Delta\theta = \theta - 0 = \theta$;

$\alpha_A = 5{,}4 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}; $\alpha_B = 2{,}4 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}

Substituindo esses valores:

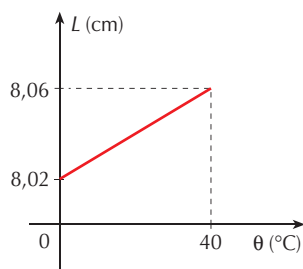
$$75{,}0 \cdot (1 + 5{,}4 \cdot 10^{-5}\,\theta) = 75{,}3 \cdot (1 + 2{,}4 \cdot 10^{-5}\,\theta) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 75{,}0 + 405 \cdot 10^{-5}\,\theta = 75{,}3 + 180{,}72 \cdot 10^{-5}\,\theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 224{,}28 \cdot 10^{-5}\,\theta = 0{,}3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta = \frac{0{,}3}{224{,}28 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow \boxed{\theta \simeq 133{,}76 \text{ °C}}$$

Resposta: $\simeq$ 133,76 °C

R. 11 O gráfico mostra como varia o comprimento de uma barra metálica em função da temperatura.

a) Determine o coeficiente de dilatação linear médio do metal, no intervalo de temperatura considerado.

b) Considerando que o gráfico continue com as mesmas características para $\theta > 40$ °C, determine o comprimento da barra a 70 °C.

Solução:

a) Do gráfico, obtemos os valores:

$L_0 = 8{,}02$ cm; $\Delta L = L - L_0 = 8{,}06 \text{ m} - 8{,}02 \text{ m} =$
$= 0{,}04$ m; $\Delta\theta = 40\ °C - 0\ °C = 40\ °C$

O coeficiente de dilatação linear médio no intervalo de temperatura considerado é dado por:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta\theta}$$

Substituindo os valores:

$$\alpha = \frac{0{,}04}{8{,}02 \cdot 40} \Rightarrow \boxed{\alpha \simeq 1{,}25 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}}$$

b) Para a temperatura $\theta = 70$ °C:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 70\ °C - 0\ °C = 70\ °C$$

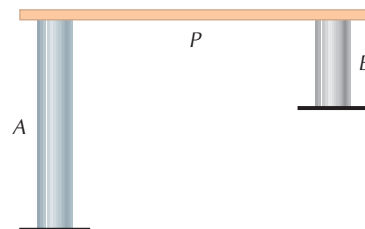
O comprimento final da barra será dado por:

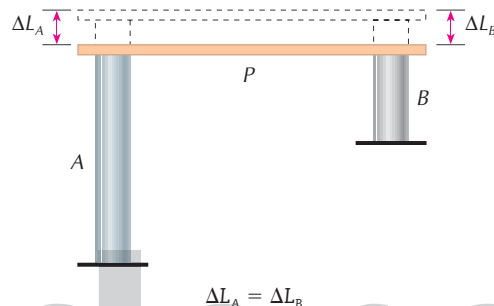
$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L = 8{,}02 \cdot (1 + 1{,}25 \cdot 10^{-4} \cdot 70) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{L = 8{,}09 \text{ cm}}$$

Respostas: a) $\simeq 1{,}25 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}; b) 8,09 cm

R. 12 Na figura, a plataforma *P* é horizontal por estar apoiada nas barras *A* e *B* de coeficientes de dilatação iguais, respectivamente, a α_A e α_B. Determine a relação entre os comprimentos iniciais L_A e L_B das barras, a fim de que a plataforma *P* permaneça horizontal em qualquer temperatura.

Solução:

Para a plataforma *P* permanecer horizontal, qualquer que seja a variação de temperatura $\Delta\theta$, as duas barras devem sofrer a mesma dilatação ΔL, conforme mostra a figura:

$$\Delta L_A = \Delta L_B$$

Mas:

$$\Delta L_A = \alpha_A \cdot L_A \cdot \Delta\theta \quad \text{e} \quad \Delta L_B = \alpha_B \cdot L_B \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

$$\alpha_A \cdot L_A \cdot \Delta\theta = \alpha_B \cdot L_B \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{\frac{L_A}{L_B} = \frac{\alpha_B}{\alpha_A}}$$

Resposta: $\frac{L_A}{L_B} = \frac{\alpha_B}{\alpha_A}$, isto é, os comprimentos iniciais das barras devem estar na razão inversa dos coeficientes de dilatação linear.

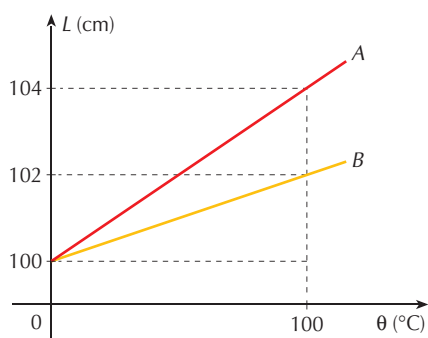
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 22 Uma barra de ouro tem a 0 °C o comprimento de 100 cm. Determine o comprimento da barra quando sua temperatura passa a ser 50 °C. O coeficiente de dilatação linear médio do ouro para o intervalo de temperatura considerado vale $15 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

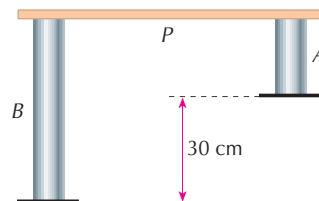
P. 23 Com o auxílio de uma barra de ferro quer-se determinar a temperatura de um forno. Para tal, a barra, inicialmente a 20 °C, é introduzida no forno. Verifica-se que, após o equilíbrio térmico, o alongamento da barra é um centésimo do comprimento inicial. Sendo $12 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} o coeficiente de dilatação linear médio do ferro, determine a temperatura do forno.

P. 24 Duas barras, uma de cobre e outra de latão, têm o mesmo comprimento a 10 °C e, a 110 °C, os seus comprimentos diferem em 1 mm. Os coeficientes de dilatação linear são: para o cobre $= 16 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}; para o latão $= 20 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Determine o comprimento, a 10 °C, de cada barra.

P. 25 (UFBA) Duas lâminas, uma de aço e outra de bronze, têm comprimentos de 20 cm a uma temperatura de 15 °C. Sabendo que os coeficientes de dilatação linear valem, respectivamente, $12 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} e $18 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}, calcule a diferença de comprimento quando as lâminas atingem uma temperatura de -5 °C.

P. 26 Na figura está representado o gráfico do comprimento L de duas barras, A e B, em função da temperatura. Sejam respectivamente α_A e α_B os coeficientes de dilatação linear do material das barras A e B. Determine:

a) os valores dos coeficientes α_A e α_B;

b) a temperatura em que a diferença entre os comprimentos das duas barras é igual a 4 cm.

P. 27 Na figura dada, a plataforma P é horizontal por estar apoiada nas colunas A (de alumínio) e B (de ferro). O desnível entre os apoios é de 30 cm. Calcule quais devem ser os comprimentos das barras a 0 °C para que a plataforma P permaneça horizontal em qualquer temperatura. São dados os coeficientes de dilatação linear do alumínio ($2,4 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}) e do ferro ($1,2 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}).

P. 28 (UFRJ) Duas barras metálicas são tais que a diferença entre seus comprimentos, em qualquer temperatura, é igual a 3 cm. Sendo os coeficientes de dilatação linear médios $15 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} e $20 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}, determine os comprimentos das barras a 0 °C.

A dilatação térmica no dia a dia

Quando ocorre um impedimento à livre dilatação ou contração de um corpo, surgem forças internas de tensão que podem levá-lo a se romper ou a se deformar. Por isso, há muitas situações do cotidiano em que a dilatação (ou a contração) térmica é "facilitada" para evitar problemas desse tipo.

1

Nas ferrovias, as barras dos trilhos devem ser assentadas com um espaço entre elas, para permitir a livre dilatação quando a temperatura varia. Se isso não fosse feito, os trilhos poderiam se entortar, devido à tensão a que ficariam submetidos.

Em pontes, viadutos e grandes construções, empregam-se as chamadas **juntas de dilatação** (**foto 1**). Elas evitam que variações das dimensões devidas a mudanças de temperatura venham a danificar a estrutura do concreto. Às vezes, a junta de dilatação consiste em roletes sobre os quais a estrutura pode deslizar, compensando os efeitos da dilatação.

Nos calçamentos, separam-se as placas de cimento por ripas de madeira ou varas de plástico (**foto 2**), que "absorvem" eventuais dilatações das placas, impedindo que elas rachem.

Os fios instalados entre os postes nas ruas ou entre as torres das linhas de alta tensão não são esticados. Esse procedimento visa a evitar que, no inverno, com a queda de temperatura, a contração possa esticar esses fios a ponto de eles se romperem. É possível observar ainda que, nos dias quentes de verão, os fios entre os postes costumam se apresentar mais curvos, em virtude da dilatação.

Em canalizações longas (**foto 3**), colocam-se, de trechos em trechos, tubos formando curvas ("cotovelos"), para possibilitar que ocorra dilatação ou contração térmica sem que haja danos.

2

3

V2_P1_UN_B_CAP_03.indd 49 22.08.09 08:51:39

2 Dilatação superficial

Considere a placa retangular da **figura 7**, que apresenta na temperatura inicial θ_0 área $A_0 = x_0 \cdot y_0$, sendo x_0 e y_0 suas dimensões lineares. Na temperatura final θ, a área é $A = x \cdot y$, em que x e y são suas dimensões lineares nessa temperatura.

Figura 7. **O aumento da temperatura acarreta aumento das dimensões lineares da placa e, portanto, de sua área.**

Aplicando a lei da dilatação linear a cada uma das dimensões, vem:

$$x = x_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$
$$y = y_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

Multiplicando membro a membro essas fórmulas, obtemos:

$$xy = x_0 y_0 \cdot (1 + \alpha + \Delta\theta)^2$$
$$A = A_0 \cdot (1 + 2\alpha \cdot \Delta\theta + \alpha^2 \cdot \Delta\theta^2)$$

Desprezando o termo $\alpha^2 \cdot \Delta\theta^2$ por ser muito pequeno e fazendo $2\alpha = \beta$, vem:

$$A = A_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta\theta)$$

Nessa fórmula, $\beta = 2\alpha$ constitui o **coeficiente de dilatação superficial** do material de que é feita a placa, tendo também como unidade o grau Celsius recíproco ($°C^{-1}$). Por exemplo:

Porcelana: $\beta = 6 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$ — Ouro: $\beta = 30 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Ferro: $\beta = 24 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$ — Alumínio: $\beta = 44 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

A partir da fórmula anterior:

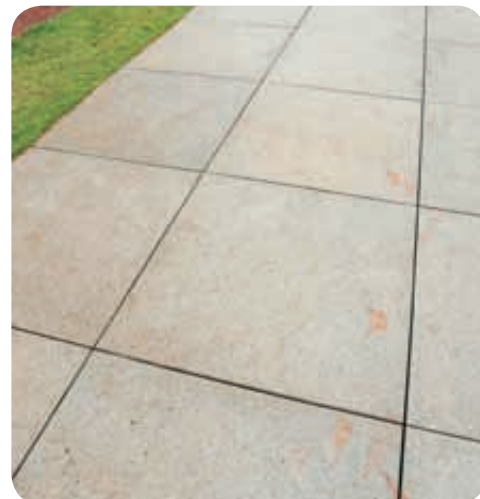
$$A = A_0 + \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow A - A_0 = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$$

Mas: $A - A_0 = \Delta A$ é a variação de área sofrida pela placa. Assim:

$$\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

A dilatação superficial ΔA é diretamente proporcional à área inicial A_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$.

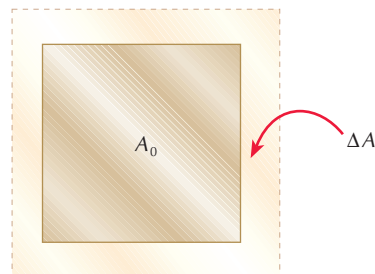
As lajotas cerâmicas que constituem alguns pisos são espaçadas entre si para evitar problemas decorrentes da dilatação superficial.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 13 Uma placa apresenta inicialmente área de 1 m^2 a 0 °C. Ao ser aquecida até 50 °C, sua área aumenta de 0,8 cm^2. Determine o coeficiente de dilatação superficial e o coeficiente de dilatação linear médio do material que constitui a placa.

Solução:
São dados:
$A_0 = 1\ m^2 = 10^4\ cm^2$;
$\Delta A = 0{,}8\ cm^2$;
$\Delta\theta = 50\ °C - 0\ °C = 50\ °C$
Aplicando a fórmula da dilatação superficial ($\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$), resulta:

$$\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \beta = \frac{\Delta A}{A_0 \cdot \Delta\theta} \Rightarrow \beta = \frac{0{,}8}{10^4 \cdot 50} \Rightarrow \boxed{\beta = 16 \cdot 10^{-7}\ °C^{-1}}$$

$$\text{Mas: } \beta = 2\alpha \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{2} \Rightarrow \boxed{\alpha = 8 \cdot 10^{-7}\ °C^{-1}}$$

Respostas: $\beta = 16 \cdot 10^{-7}\ °C^{-1}$ e $\alpha = 8 \cdot 10^{-7}\ °C^{-1}$

R. 14 Um disco de ebonite tem orifício central de diâmetro igual a 1 cm. Determine o aumento da área do orifício quando a temperatura do disco varia de 10 °C para 100 °C. O coeficiente de dilatação superficial médio da ebonite é, no intervalo considerado, igual a $1{,}6 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$.

Solução:
Quando o disco é aquecido, o orifício central aumenta de diâmetro, como se fosse constituído pelo material do disco. A área inicial do orifício vale:

$$A_0 = \pi R_0^2 = \frac{\pi d_0^2}{4}$$

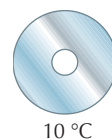
10 °C

Sendo $d_0 = 1$ cm, vem: $A_0 = \pi \cdot 0{,}25\ cm^2$
A variação de temperatura é $\Delta\theta = 100\ °C - 10\ °C = 90\ °C$ e o coeficiente de dilatação superficial é $\beta = 1{,}6 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$.
Aplicando a fórmula da dilatação superficial ($\Delta A = \beta \cdot A_0 \cdot \Delta\theta$), vem:

$$\Delta A = 1{,}6 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \cdot 0{,}25 \cdot 90 \Rightarrow \boxed{\Delta A = 36\pi \cdot 10^{-4}\ cm^2}$$

100 °C

Resposta: $36\pi \cdot 10^{-4}\ cm^2$

Observação:
Podemos explicar o aumento do orifício tendo em vista que, na dilatação, há aumento da distância entre as moléculas. De fato, aumentando a distância entre as moléculas da borda do orifício, o perímetro deste aumenta, aumentando assim o seu diâmetro.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 29 Uma chapa de chumbo tem área de 900 cm^2 a 10 °C. Determine a área de sua superfície a 60 °C. O coeficiente de dilatação linear médio do chumbo entre 10 °C e 60 °C vale $27 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$.

P. 30 Um anel de ouro apresenta área interna de 5 cm^2 a 20 °C. Determine a dilatação superficial dessa área interna quando o anel é aquecido a 120 °C. Entre 20 °C e 120 °C, o coeficiente de dilatação superficial médio do ouro é $30 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$.

P. 31 (Faap-SP) Um pino cilíndrico de alumínio (β = coeficiente de dilatação superficial = $4{,}0 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$) tem raio 20,000 mm a 20 °C. A que temperatura ele deve ser resfriado para se ajustar exatamente num orifício de raio 19,988 mm?

P. 32 (Fuvest-SP) Considere uma chapa de ferro circular, com um orifício circular concêntrico. À temperatura inicial de 30 °C, o orifício tem um diâmetro de 1,0 cm. A chapa é então aquecida a 330 °C.
a) Qual é a variação do diâmetro do furo, se o coeficiente de dilatação linear do ferro é $12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$?
b) A variação do diâmetro do furo depende do diâmetro da chapa?

3 Dilatação volumétrica

Na **figura 8** está representado um sólido homogêneo com forma de paralelepípedo em duas temperaturas, θ_0 e $\theta > \theta_0$. As dimensões lineares desse sólido são x_0, y_0 e z_0 na temperatura inicial θ_0, passando para x, y e z quando na temperatura final θ. Os volumes inicial e final valem, respectivamente, $V_0 = x_0y_0z_0$ e $V = xyz$.

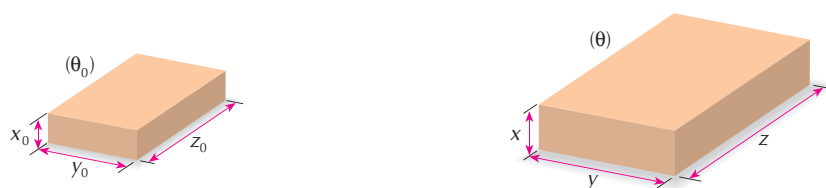



Figura 8. **Quando a temperatura aumenta, aumentam as dimensões lineares do sólido e, portanto, seu volume.**

Aplicando a lei da dilatação linear a cada uma das dimensões, vem:

$$x = x_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$
$$y = y_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$
$$z = z_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

Multiplicando membro a membro as fórmulas anteriores, obtemos:

$$xyz = x_0y_0z_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)^3$$
$$V = V_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta\theta + 3\alpha^2 \cdot \Delta\theta^2 + \alpha^3 \cdot \Delta\theta^3)$$

Os termos que apresentam α^2 e α^3 são muito pequenos e podem ser desprezados. Assim, fazendo $3\alpha = \gamma$, vem:

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

Nessa fórmula, $\gamma = 3\alpha$ constitui o **coeficiente de dilatação volumétrica** do material de que é feito o sólido, sendo medido, como os coeficientes anteriores, em grau Celsius recíproco ($°C^{-1}$). Alguns exemplos:

Porcelana: $\gamma = 9 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Ferro: $\gamma = 36 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Ouro: $\gamma = 45 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Alumínio: $\gamma = 66 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

A partir da fórmula anterior:

$$V = V_0 + \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow V - V_0 = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Como $V - V_0 = \Delta V$ é a variação de volume sofrida pelo sólido, temos:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

A dilatação volumétrica ΔV é diretamente proporcional ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *O anel de Gravezande*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 15 O coeficiente de dilatação linear médio de um sólido homogêneo é $12,2 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Um cubo desse material tem volume de 20 cm^3 a 10 °C. Determine:

a) o aumento de volume sofrido pelo cubo quando sua temperatura se eleva para 40 °C;

b) a dilatação relativa correspondente, expressa em porcentagem.

Solução:

a) O coeficiente de dilatação volumétrica é o triplo do coeficiente de dilatação linear: $\gamma = 3\alpha$.

Como $\alpha = 12,2 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}, vem:

$$\gamma = 3 \cdot 12,2 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \gamma = 36,6 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$$

O volume inicial é $V_0 = 20$ cm^3; a variação de temperatura vale:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 40 - 10 \Rightarrow \Delta\theta = 30\ °C$$

$\theta_0 = 10$ °C — V_0 — Inicial; $\theta = 40$ °C — V — Final

Aplicando a fórmula da dilatação volumétrica, obtemos:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \Delta V = 36,6 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 30 \Rightarrow \boxed{\Delta V \simeq 0,022\ cm^3}$$

b) A dilatação relativa vale:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{0,022}{20} = 0,0011 \Rightarrow \boxed{\frac{\Delta V}{V_0} = 0,11\%}$$

Respostas: a) O volume do cubo aumenta aproximadamente 0,022 cm^3; b) 0,11%

Observação:

Note que o volume inicial do cubo era de 20 cm^3 e o aumento de volume foi de apenas 0,022 cm^3, aproximadamente. Portanto, a dilatação relativa é de apenas 0,11%, uma alteração volumétrica que somente poderá ser percebida com o auxílio de aparelhos extremamente sensíveis.

R. 16 Um tubo de ensaio apresenta, a 0 °C, um volume interno (limitado pelas paredes) de 20 cm^3. Determine o volume interno desse tubo a 50 °C. O coeficiente de dilatação volumétrica médio do vidro é $25 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} para o intervalo de temperatura considerado.

Solução:

O volume interno de um recipiente varia com a temperatura como se ele fosse maciço, constituído pelo material de suas paredes.

São dados o volume inicial ($V_0 = 20$ cm^3) e o coeficiente de dilatação volumétrica ($\gamma = 25 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}).

Variação de temperatura:

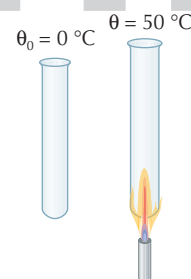
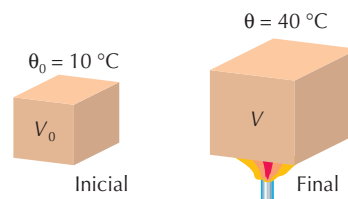
$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = 50\ °C - 0\ °C = 50\ °C$$

Aplicando a fórmula da dilatação volumétrica, obtemos:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \Rightarrow \Delta V = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 50 \Rightarrow V = 0,025\ cm^3$$

O volume final do tubo é dado pela soma do volume inicial com o aumento de volume:

$$V = V_0 + \Delta V \Rightarrow V = 20 + 0,025 \Rightarrow \boxed{V = 20,025\ cm^3}$$

Resposta: 20,025 cm^3

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 33 Um paralelepípedo de chumbo tem a 0 °C o volume de 100 litros. A que temperatura ele deve ser aquecido para que seu volume aumente de 0,405 litro? O coeficiente de dilatação linear médio do chumbo é $27 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} para o intervalo de temperatura considerado.

P. 34 Um balão de vidro apresenta a 0 °C volume interno de 500 mℓ. Determine a variação do volume interno desse balão quando ele é aquecido até 50 °C. O vidro que constitui o balão tem coeficiente de dilatação volumétrica médio igual a $3 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} entre 0 °C e 50 °C.

P. 35 (PUC-RS) Um paralelepípedo a 10 °C possui dimensões iguais a $10 \times 20 \times 30$ cm, sendo constituído de um material cujo coeficiente de dilatação térmica linear é $8,0 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Qual é o acréscimo de volume que ele sofre quando sua temperatura é elevada para 110 °C?

Dilatação térmica dos líquidos

Objetivos

- Diferenciar dilatação real de dilatação aparente.
- Relacionar o coeficiente de dilatação aparente de um líquido com os coeficientes de dilatação real do líquido e de dilatação volumétrica do frasco.

Termos e conceitos

- dilatação real
- dilatação aparente

A dilatação volumétrica de um líquido (**fig. 9**) segue uma lei idêntica à da dilatação dos sólidos, válida quando o intervalo de temperatura considerado não é muito grande. Assim, a variação ΔV do volume líquido é diretamente proporcional ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$ ocorrida:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessa fórmula, γ é uma constante de proporcionalidade denominada **coeficiente de dilatação real** do líquido, cuja unidade é o grau Celsius recíproco: $°C^{-1}$.

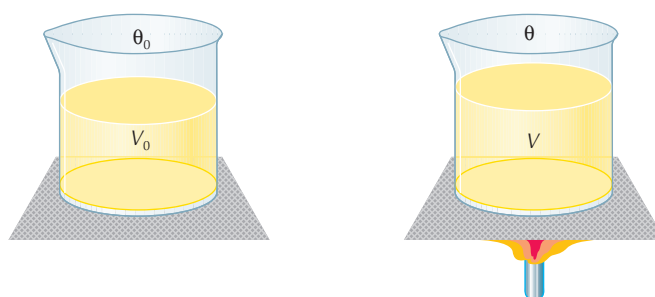



Figura 9. A dilatação térmica de um líquido é estudada estando ele num recipiente sólido.

Alguns exemplos de coeficientes de dilatação real:

Maior dilatação ↓

Mercúrio: $\gamma = 180 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Glicerina: $\gamma = 490 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Benzeno: $\gamma = 1.060 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

Como o líquido sempre está contido num recipiente sólido, que também se dilata, a medida da dilatação do líquido é feita indiretamente. Vamos discutir um dos processos de medida indireta da dilatação do líquido.

De modo geral, os líquidos se dilatam mais que os sólidos. Por isso, um recipiente completamente cheio com líquido transborda quando aquecido. Por exemplo: completando-se o tanque de combustível de um carro numa manhã fria, provavelmente ocorrerá vazamento em virtude do aumento de temperatura, ao longo do dia, caso não haja consumo de combustível.

Considere o mesmo frasco da **figura 9**, agora provido de um "ladrão" (**fig. 10**). Nesse frasco é colocado um líquido até o nível do ladrão (**fig. 10A**). Quando se aquece o conjunto, parte do líquido sai pelo ladrão (**fig. 10B**).

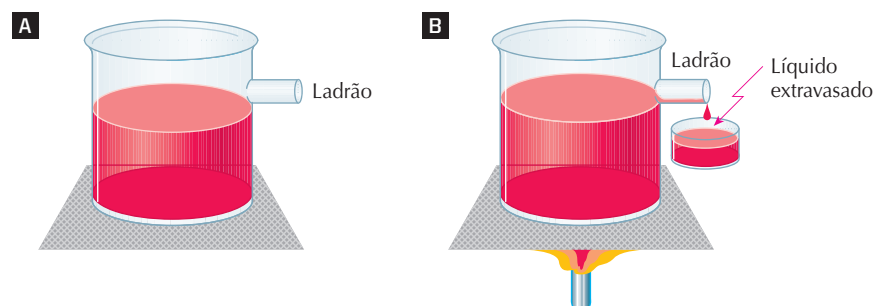



Figura 10. O volume de líquido que extravasa corresponde à medida da dilatação aparente.

O volume de líquido extravasado equivale à **dilatação aparente do líquido** ($\Delta V_{ap.}$) e não à dilatação real (ΔV), pois o frasco também se dilata. Por exemplo, considerando que transbordam 5 cm^3, temos:

$$\Delta V_{ap.} = 5\ cm^3$$

Sendo conhecida a dilatação do frasco (aumento de seu volume interno), podemos determinar a dilatação real sofrida pelo líquido. Por exemplo, se o volume do recipiente até a altura do ladrão aumenta de 2 cm^3 ($\Delta V_F = 2\ cm^3$), a dilatação real do líquido será:

$$\Delta V = \Delta V_{ap.} + \Delta V_F$$

Sendo $\Delta V_{ap.} = 5\ cm^3$ e $\Delta V_F = 2\ cm^3$, temos:

$$\Delta V = 5 + 2 \Rightarrow \Delta V = 7\ cm^3$$

A dilatação aparente $\Delta V_{ap.}$ e a dilatação do frasco ΔV_F são proporcionais ao volume inicial V_0 e à variação de temperatura $\Delta\theta$:

$$\Delta V_{ap.} = \gamma_{ap.} \cdot V_0 \cdot \Delta\theta \qquad \Delta V_F = \gamma_F \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Nessas fórmulas, $\gamma_{ap.}$ é o **coeficiente de dilatação aparente** do líquido e γ_F é o **coeficiente de dilatação volumétrica** do frasco.

O volume de líquido que extravasa equivale à dilatação aparente do líquido.

Relação entre os coeficientes

Comparando as fórmulas anteriores com a lei da dilatação do líquido ($\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$), obtemos:

$$\Delta V = \Delta V_{ap.} + \Delta V_F \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta\theta = \gamma_{ap.} V_0 \cdot \Delta\theta + \gamma_F \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$$

Portanto:

$$\gamma = \gamma_{ap.} + \gamma_F \quad \text{ou} \quad \gamma_{ap.} = \gamma - \gamma_F$$

O coeficiente de dilatação aparente de um líquido é dado pela diferença entre o coeficiente de dilatação real e o coeficiente de dilatação volumétrica do frasco.

Sendo assim, o coeficiente de dilatação aparente depende da natureza do líquido e do material que constitui o recipiente que o contém.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *O comportamento anômalo da água*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 17 Um recipiente de vidro de coeficiente de dilatação linear médio $9 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} tem volume de 100 cm³ a 0 °C, estando completamente cheio com um líquido. Ao ser aquecido até 200 °C, extravasam 5 cm³ de líquido. Determine:

a) o coeficiente de dilatação aparente do líquido;

b) o coeficiente de dilatação real do líquido.

Solução:

a) O extravasamento mede a dilatação aparente do líquido: $\Delta V_{ap.} = 5$ cm³

Temos ainda: $V_0 = 100$ cm³;

$\Delta\theta = 200$ °C $-$ 0 °C $= 200$ °C

Da fórmula $\Delta V_{ap.} = \gamma_{ap.} \cdot V_0 \cdot \Delta\theta$, obtemos:

$$\gamma_{ap.} = \frac{\Delta V_{ap.}}{V_0 \cdot \Delta\theta} = \frac{5}{100 \cdot 200} = \frac{2{,}5}{10.000} = 2{,}5 \cdot 10^{-4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma_{ap.} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}}$$

b) O coeficiente de dilatação real γ é dado pela soma: $\gamma = \gamma_{ap.} + \gamma_F$

O coeficiente de dilatação volumétrica do frasco é o triplo do coeficiente de dilatação linear:

$$\gamma_F = 3\alpha_F = 3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 27 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \gamma_F = 0{,}27 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$$

Somando:

$$\gamma = (2{,}5 \cdot 10^{-4}) + (0{,}27 \cdot 10^{-4}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\gamma = 2{,}77 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}}$$

Respostas: a) $2{,}5 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}; b) $2{,}77 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}

R. 18 Um recipiente de vidro tem a 0 °C volume interno de 30 cm³. Calcule o volume de mercúrio a ser colocado no recipiente de modo que o volume da parte vazia não se altere ao variar a temperatura. Dados: coeficiente de dilatação volumétrica do vidro $= 24 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}; coeficiente de dilatação do mercúrio $= 180 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

Solução:

O volume da parte vazia é dado pela diferença entre os volumes do frasco (V_F) e do líquido (V). Para que ele permaneça constante com a variação de temperatura, é necessário que o líquido e o frasco sofram dilatações iguais ($\Delta V = \Delta V_F$).

Pelas leis da dilatação:

$$\begin{cases} \Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta \\ \Delta V_F = \gamma_F \cdot V_F \cdot \Delta\theta \end{cases}$$

Portanto:

$$\Delta V = \Delta V_F \Rightarrow \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta = \gamma_F \cdot V_F \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{\frac{V}{V_F} = \frac{\gamma_F}{\gamma}}$$

Observe que os volumes iniciais do líquido e do frasco devem estar na razão inversa dos respectivos coeficientes de dilatação, conclusão análoga à que foi estabelecida no exercício **R.12**.

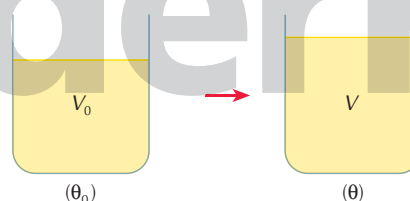
Substituindo os valores numéricos:

$$\left.\begin{aligned} V_F &= 30\ \text{cm}^3 \\ \gamma_F &= 24 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1} \\ \gamma &= 180 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1} \end{aligned}\right\}$$

$$V = V_F \cdot \frac{\gamma_F}{\gamma} = 30 \frac{24 \cdot 10^{-6}}{180 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{V = 4\ \text{cm}^3}$$

Resposta: 4 cm³

R. 19 Um líquido cujo coeficiente de dilatação térmica é γ tem densidade d_0 na temperatura inicial θ_0. Ao ser aquecido até uma temperatura θ, sua densidade se altera para d. Relacione a densidade final d com a variação de temperatura ocorrida $\Delta\theta$, com a densidade inicial d_0 e com o coeficiente de dilatação térmica γ.

Solução:

Seja m a massa de certa porção de líquido que ocupa o volume V_0 na temperatura θ_0 e o volume V na temperatura θ. Sendo γ o coeficiente de dilatação térmica do líquido, temos:

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$

As densidades do líquido nas temperaturas referidas são dadas por:

$$d_0 = \frac{m}{V_0} \quad ① \qquad d = \frac{m}{V} \quad ②$$

Substituindo V em ②: $d = \dfrac{m}{V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)}$ ③

Substituindo ① em ③: $\boxed{d = \dfrac{d_0}{1 + \gamma \cdot \Delta\theta}}$

Resposta: $d = \dfrac{d_0}{1 + \gamma \cdot \Delta\theta}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 36 Um certo frasco de vidro está completamente cheio, com 50 cm³ de mercúrio. O conjunto se encontra inicialmente a 28 °C. No caso, o coeficiente de dilatação médio do mercúrio tem um valor igual a $180 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} e o coeficiente de dilatação linear médio do vidro vale $9 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Determine o volume de mercúrio extravasado quando a temperatura do conjunto se eleva para 48 °C.

P. 37 Um recipiente tem, a 0 °C, capacidade (volume interno) de 1.000 cm³. Seu coeficiente de dilatação volumétrica é $25 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} e ele está completamente cheio de glicerina. Aquecendo-se o recipiente a 100 °C, há um extravasamento de 50,5 cm³ de glicerina. Determine:

a) o coeficiente de dilatação aparente da glicerina;

b) o coeficiente de dilatação real da glicerina.

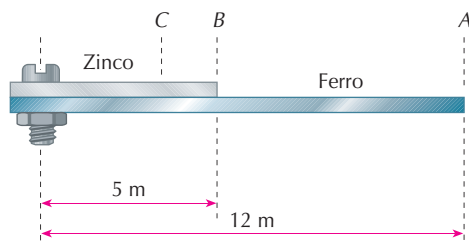
P. 38 A 0 °C, um recipiente de vidro tem capacidade de 700 cm³. Qual volume de mercúrio deve ser colocado a 0 °C no recipiente para que, aumentando-se a temperatura, não se altere o volume da parte vazia? O coeficiente de dilatação volumétrica médio do vidro é $\frac{1}{38.850}$ °C^{-1}, e o do mercúrio, $\frac{1}{5.550}$ °C^{-1}.

P. 39 (FEI-SP) Um recipiente cujo volume é de 1.000 cm³ a 0 °C contém 980 cm³ de um líquido à mesma temperatura. O conjunto é aquecido e, a partir de uma certa temperatura, o líquido começa a transbordar. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação volumétrica do recipiente vale $2 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1} e o do líquido vale $1 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}, qual é a temperatura em que ocorre o início de transbordamento do líquido?

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

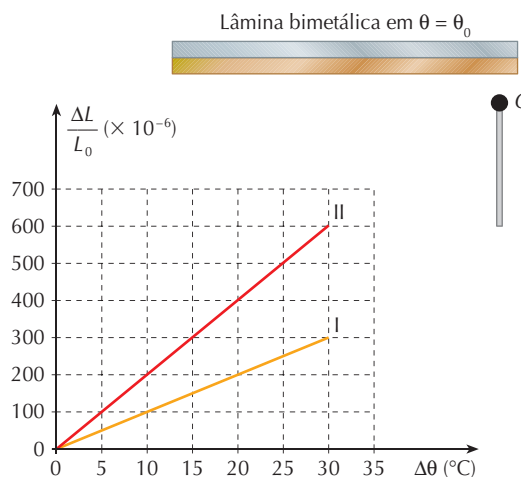
P. 40 (PUC-SP) A tampa de zinco de um frasco de vidro agarrou no gargalo de rosca externa e não foi possível soltá-la. Sendo os coeficientes de dilatação linear do zinco e do vidro respectivamente iguais a $30 \cdot 10^{-6}$ e $8{,}5 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}, como proceder? Justifique sua resposta. Temos à disposição um caldeirão com água quente e outro com água gelada.

P. 41 (ITA-SP) O coeficiente médio de dilatação térmica linear do aço é $1{,}2 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}. Usando trilhos de aço de 8,0 m de comprimento, um engenheiro construiu uma ferrovia deixando um espaço de 0,50 cm entre os trilhos, quando a temperatura era de 28 °C. Num dia de sol forte os trilhos soltaram-se dos dormentes. Que temperatura, no mínimo, deve ter sido atingida pelos trilhos?

P. 42 (Fuvest-SP) Duas barras metálicas finas, uma de zinco e outra de ferro, cujos comprimentos, a uma temperatura de 300 K, valem 5,0 m e 12,0 m, respectivamente, são sobrepostas e aparafusadas uma à outra em uma de suas extremidades, conforme ilustra a figura. As outras extremidades B e A das barras de zinco e ferro, respectivamente, permanecem livres. Os coeficientes de dilatação linear do zinco e do ferro valem $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ K^{-1} e $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ K^{-1}, respectivamente.

Desprezando as espessuras das barras, determine:

a) a variação da distância entre as extremidades A e B quando as barras são aquecidas até 400 K;

b) a distância até o ponto A de um ponto C da barra de zinco cuja distância ao ponto A não varia com a temperatura.

P. 43 (Vunesp) A figura mostra uma lâmina bimetálica, de comprimento L_0 na temperatura θ_0, que deve tocar o contato C quando aquecida. A lâmina é feita dos metais I e II, cujas variações relativas do comprimento $\frac{\Delta L}{L_0}$ em função da variação de temperatura $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ encontram-se no gráfico.

Determine:

a) o coeficiente de dilatação linear dos metais I e II;

b) qual dos metais deve ser utilizado na parte superior da lâmina para que o dispositivo funcione como desejado (justifique sua resposta).

P. 44 (Faap-SP) Um disco circular de ferro, cuja área vale 100 cm^2, ajusta-se exatamente numa cavidade praticada num bloco de cobre, estando ambos a 0 °C. Determine a área da coroa circular vazia quando o conjunto estiver a 100 °C. Os coeficientes de dilatação linear do ferro e do cobre valem respectivamente $10 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1} e $16 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

P. 45 (Mackenzie-SP) O coeficiente de dilatação linear médio do ferro é igual a 0,0000117 °C^{-1}. De quanto deve aumentar a temperatura de um bloco de ferro para que seu volume aumente de 1%?

P. 46 (Fuvest-SP) A 10 °C, 100 gotas idênticas de um líquido ocupam um volume de 1,0 cm^3. A 60 °C, o volume ocupado pelo líquido é de 1,01 cm^3. Calcule:

a) a massa de 1 gota de líquido a 10 °C, sabendo-se que sua densidade, a essa temperatura, é de 0,90 g/cm^3;

b) o coeficiente de dilatação volumétrica do líquido.

P. 47 (UFPR) Uma taça de alumínio de 120 cm^3 contém 119 cm^3 de glicerina a 21 °C. Considere o coeficiente de dilatação linear do alumínio como sendo de $2,3 \cdot 10^{-5}$ K^{-1} e o coeficiente de dilatação volumétrica da glicerina de $5,1 \cdot 10^{-4}$ K^{-1}. Se a temperatura do sistema taça-glicerina for aumentada para 39 °C, a glicerina transbordará ou não? Em caso afirmativo, determine o volume transbordado; em caso negativo, determine o volume de glicerina que ainda caberia no interior da taça.

P. 48 (UFPE) Uma caixa cúbica metálica de 10 ℓ está completamente cheia de óleo, quando a temperatura do conjunto é de 20 °C. Elevando-se a temperatura até 30 °C, um volume igual a 80 cm^3 de óleo transborda. Sabendo-se que o coeficiente de dilatação volumétrica do óleo é igual a $0,9 \cdot 10^{-3}$ °C^{-1}, determine:

a) a dilatação do recipiente, em cm^3;

b) o coeficiente de dilatação linear do metal.

P. 49 (FEI-SP) Um recipiente de vidro tem capacidade C_0 = 91,000 cm^3 a 0 °C e contém, a essa temperatura, 90,000 cm^3 de mercúrio. A que temperatura o recipiente estará completamente cheio de mercúrio?
(Dados: coeficiente de dilatação linear do vidro = $32 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}; coeficiente de dilatação cúbica do mercúrio = $182 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1})

TESTES PROPOSTOS

T. 41 (UFRN) João precisa abrir um recipiente de conserva cuja tampa está emperrada. O recipiente é de vidro comum, e a tampa é de alumínio. Para facilitar a abertura, sugeriu-se que ele colocasse a tampa próximo da chama do fogão por alguns segundos e, imediatamente após afastar o recipiente da chama, tentasse abri-lo. O procedimento sugerido vai favorecer a separação entre a tampa e o recipiente, facilitando a tarefa de destampá-lo, porque:

a) o coeficiente de dilatação térmica do vidro é maior que o do alumínio.

b) o coeficiente de dilatação térmica do alumínio é maior que o do vidro.

c) o calor da chama diminui a pressão interna do líquido da conserva.

d) o calor da chama diminui o volume do recipiente.

T. 42 (PUC-SP) Um mecânico de automóveis precisa soltar um anel que está fortemente preso a um eixo. Sabe-se que o anel é feito de aço, de coeficiente de dilatação linear $1,1 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}, e o eixo, de alumínio, cujo coeficiente é $2,3 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}. Lembrando que tanto o aço quanto o alumínio são bons condutores térmicos e sabendo-se que o anel não pode ser danificado e que não está soldado ao eixo, o mecânico deve:

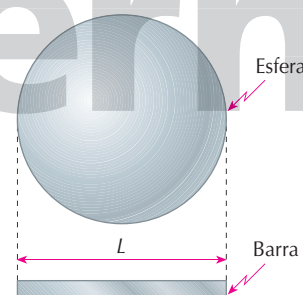
a) aquecer somente o eixo.

b) aquecer o conjunto (anel + eixo).

c) resfriar o conjunto (anel + eixo).

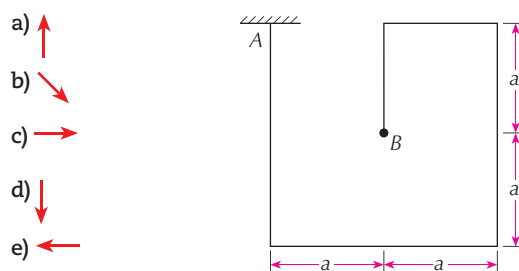
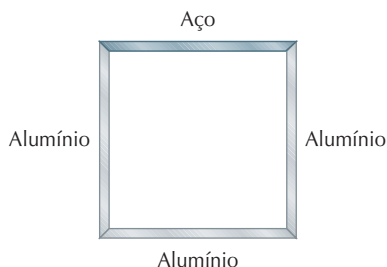
d) resfriar somente o anel.

e) aquecer o eixo e, logo após, resfriar o anel.

T. 43 (UFV-MG) A figura ao lado ilustra uma esfera maciça de diâmetro L e uma barra de mesmo material com comprimento também igual a L, ambos a uma mesma temperatura inicial.

Quando a temperatura dos dois corpos for elevada para um mesmo valor final, a razão entre o aumento do diâmetro da esfera e o aumento do comprimento da barra será:

a) $\frac{1}{3}$ b) 1 c) $\frac{1}{9}$ d) $\frac{9}{1}$ e) $\frac{3}{1}$

T. 44 (Uema) Um arame de aço, dobrado conforme a figura, está engastado no teto, no ponto A. Aumentando a sua temperatura de maneira homogênea, a extremidade B terá um deslocamento que será mais bem representado por qual dos vetores?

a) ↑
b) ↘
c) →
d) ↓
e) ←

T. 45 (Unirio-RJ) Um quadrado foi montado com três hastes de alumínio ($\alpha_{A\ell} = 24 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$) e uma haste de aço ($\alpha_{Aço} = 12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$), todas inicialmente à mesma temperatura. O sistema é, então, submetido a um processo de aquecimento, de forma que a variação de temperatura é a mesma em todas as hastes.

Podemos afirmar que, ao final do processo de aquecimento, a figura formada pelas hastes estará mais próxima de um:

a) quadrado.
b) retângulo.
c) losango.
d) trapézio retângulo.
e) trapézio isósceles.

T. 46 (Uespi) O coeficiente de dilatação térmica linear de um material sendo de $2{,}0 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$, significa dizer que:

a) o material sofre uma variação de 2,0 m para cada $10^{-6}\ °C^{-1}$ de variação de temperatura.
b) 2,0 m desse material sofrem uma variação de 10^{-6} m para cada 1 °C na temperatura.
c) o comprimento de uma barra do material não sofre variação para variação de temperatura de 2,0 °C.
d) para cada 1 °C na variação da temperatura, cada metro do material varia de 2,0 cm.
e) se uma haste de 2,0 m variar em 10 °C sua temperatura, sofrerá uma variação de 0,04 mm no seu comprimento.

T. 47 (Uniube-MG) No continente europeu uma linha férrea da ordem de 600 km de extensão tem sua temperatura variando de −10 °C no inverno até 30 °C no verão. O coeficiente de dilatação linear do material de que é feito o trilho é $10^{-5}\ °C^{-1}$. A variação de comprimento que os trilhos sofrem na sua extensão é, em m, igual a:

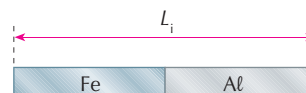
a) 40
b) 100
c) 140
d) 200
e) 240

T. 48 (Uepa) Os trilhos de trem, normalmente de 20 m de comprimento, são colocados de modo a manterem entre duas pontas consecutivas uma pequena folga chamada junta de dilatação. Isso evita que eles se espremam, sofrendo deformações devido à ação do calor nos dias quentes. Considere que uma variação de temperatura da noite para o (meio) dia possa chegar a (aproximadamente) 25 °C, fazendo-os dilatar cerca de 5 mm. Nesse caso, o coeficiente de dilatação linear do material de que é feito o trilho é, em $°C^{-1}$, de:

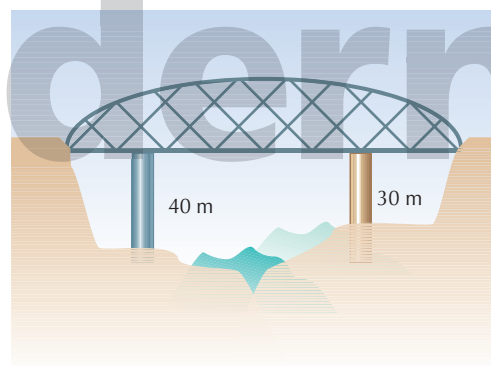
a) 10^4
b) 1
c) 10^{-3}
d) $2 \cdot 10^{-5}$
e) 10^{-5}

T. 49 (UCPel-RS) Duas barras *A* e *B* com coeficientes de dilatação linear α_A e α_B, respectivamente, apresentam comprimentos iniciais diferentes, a 0 °C. O da *A* é o dobro do da *B*. As barras, ao sofrerem igual aumento de temperatura, apresentam igual dilatação linear. Pode-se afirmar que:

a) $\alpha_A = 2\alpha_B$
b) $\alpha_A = \alpha_B$
c) $\alpha_A = \frac{\alpha_B}{2}$
d) $\alpha_A = 3\alpha_B$
e) $\alpha_A = \frac{\alpha_B}{3}$

T. 50 (FEI-SP) Duas barras, sendo uma de ferro e outra de alumínio, de mesmo comprimento *L* = 1 m a 20 °C, são unidas e aquecidas até 320 °C.

Sabe-se que o coeficiente de dilatação linear do ferro é de $12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$ e o do alumínio, de $22 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$. Qual é o comprimento final após o aquecimento?

a) L_f = 2,0108 m
b) L_f = 2,0202 m
c) L_f = 2,0360 m
d) L_f = 2,0120 m
e) L_f = 2,0102 m

T. 51 (Funrei-MG) A figura mostra uma ponte apoiada sobre dois pilares feitos de materiais diferentes.

O pilar mais longo, de comprimento L_1 = 40 m, possui coeficiente de dilatação linear $\alpha_1 = 18 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$. O pilar mais curto tem comprimento L_2 = 30 m. Para que a ponte permaneça sempre na horizontal, o material do segundo pilar deve ter um coeficiente de dilatação linear α_2 igual a:

a) $42 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
b) $24 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
c) $13{,}5 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
d) $21 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
e) $36 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

T. 52 (Ufes) Quer-se encaixar um rolamento cilíndrico, feito de aço, em um mancal cilíndrico, feito de liga de alumínio. O coeficiente de dilatação linear da liga de alumínio vale $25{,}0 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$. À temperatura de 22 °C, o rolamento tem o diâmetro externo 0,1% maior que o diâmetro interno do mancal. A temperatura mínima à qual o mancal deve ser aquecido, para que o rolamento se encaixe, é:

a) 20 °C
b) 40 °C
c) 42 °C
d) 60 °C
e) 62 °C

T. 53 (PUC-RS) Um termostato é um dispositivo utilizado para controlar a temperatura em diversos equipamentos elétricos. Um dos tipos de termostato é construído com duas lâminas metálicas 1 e 2, firmemente ligadas, conforme a **figura I**.

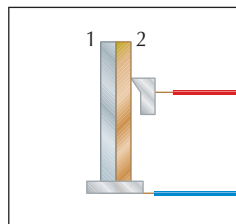



Figura I.

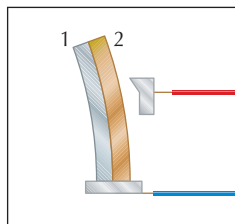



Figura II.

Quando a temperatura aumenta, o conjunto se curva em forma de arco (**fig. II**), fazendo com que, a partir de certa temperatura, o circuito seja aberto, interrompendo a passagem de corrente elétrica. Supondo que a lâmina seja constituída de ferro e cobre, cujos coeficientes de dilatação linear médios são, respectivamente, $1{,}2 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$ e $1{,}7 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$, para produzir-se o efeito descrito, a lâmina ________ deve ter coeficiente de dilatação ________ do que a outra, correspondendo, portanto, ao ________.

As informações que preenchem correta e respectivamente as lacunas estão reunidas em:

a) 1 — menor — ferro
b) 1 — menor — cobre
c) 1 — maior — cobre
d) 2 — menor — ferro
e) 2 — maior — ferro

T. 54 (UFF-RJ) Nos ferros elétricos automáticos, a temperatura de funcionamento, que é previamente regulada por um parafuso, é controlada por um termostato constituído de duas lâminas bimetálicas de igual composição.

Os dois metais que formam cada uma das lâminas têm coeficientes de dilatação α_I (o mais interno) e α_{II}. As duas lâminas estão encurvadas e dispostas em contato elétrico, uma no interior da outra, como indicam as figuras abaixo.

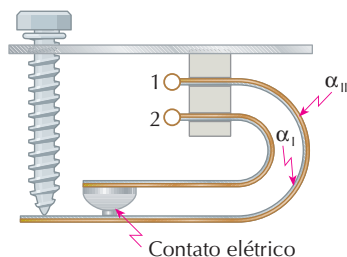



Figura I.

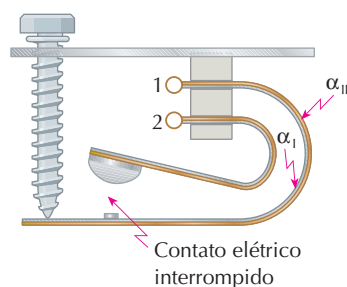
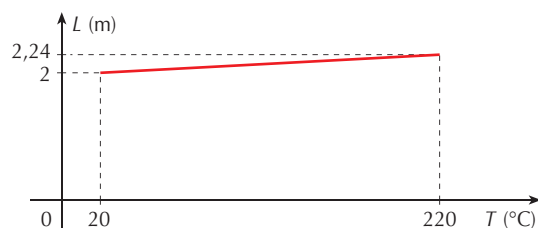



Figura II.

A corrente, suposta contínua, entra pelo ponto 1 e sai pelo ponto 2, conforme a **figura I**, aquecendo a resistência. À medida que a temperatura aumenta, as lâminas vão se encurvando, devido à dilatação dos metais, sem interromper o contato. Quando a temperatura desejada é alcançada, uma das lâminas é detida pelo parafuso, enquanto a outra continua encurvando-se, interrompendo o contato entre elas, conforme a **figura II**.

Com relação à temperatura do ferro regulada pelo parafuso e aos coeficientes de dilatação dos metais das lâminas, é correto afirmar que, quanto mais apertado o parafuso:

a) menor será a temperatura de funcionamento e $\alpha_I > \alpha_{II}$.
b) maior será a temperatura de funcionamento e $\alpha_I < \alpha_{II}$.
c) maior será a temperatura de funcionamento e $\alpha_I > \alpha_{II}$.
d) menor será a temperatura de funcionamento e $\alpha_I < \alpha_{II}$.
e) menor será a temperatura de funcionamento e $\alpha_I = \alpha_{II}$.

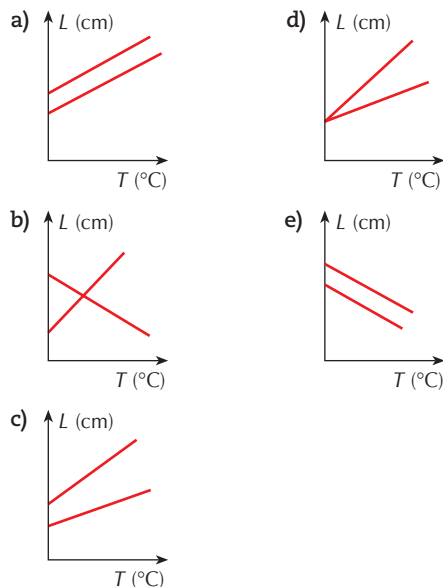
T. 55 (UFPR) Um cientista está à procura de um material que tenha um coeficiente de dilatação alto. O objetivo dele é produzir vigas desse material para utilizá-las como suportes para os telhados das casas. Assim, nos dias muito quentes, as vigas dilatar-se-iam bastante, elevando o telhado e permitindo uma certa circulação de ar pela casa, refrescando o ambiente. Nos dias frios, as vigas encolheriam e o telhado abaixaria, não permitindo a circulação de ar. Após algumas experiências, ele obteve um composto com o qual fez uma barra. Em seguida, o cientista mediu o comprimento *L* da barra em função da temperatura *T* e obteve o gráfico da figura.

Analisando o gráfico, é correto afirmar que o coeficiente de dilatação linear do material produzido pelo cientista vale:

a) $\alpha = 6 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$
b) $\alpha = 5 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$
c) $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}\ °C^{-1}$
d) $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$
e) $\alpha = 4 \cdot 10^{-4}\ °C^{-1}$

T. 56 (UFRGS-RS) Uma barra de aço e uma barra de vidro têm o mesmo comprimento à temperatura de 0 °C, mas, a 100 °C, seus comprimentos diferem de 0,1 cm. (Considere os coeficientes de dilatação linear do aço e do vidro iguais a $12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$ e $8 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$, respectivamente.) Qual é o comprimento das duas barras à temperatura de 0 °C?

a) 50 cm
b) 83 cm
c) 125 cm
d) 250 cm
e) 400 cm

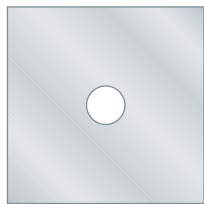
T. 57 (Olimpíada Brasileira de Física) Duas barras metálicas, de comprimentos diferentes e coeficientes de dilatação iguais, são aquecidas e, a partir dos valores medidos para o comprimento e a temperatura, foi elaborado um gráfico. A figura que melhor representa o gráfico obtido é:

a) L (cm) / T (°C)

d)
b)
e)
c)
T. 58 (UFPB) Se o diâmetro de uma moeda aumenta 0,2% quando sua temperatura é elevada em 100 °C, os aumentos percentuais na espessura, na área e no volume serão respectivamente:

a) 0,1%, 0,2%, 0,2%
b) 0,2%, 0,2%, 0,2%
c) 0,2%, 0,4%, 0,5%
d) 0,2%, 0,4%, 0,6%
e) 0,3%, 0,4%, 0,8%

T. 59 (PUC-RJ) Uma chapa quadrada, feita de um material encontrado no planeta Marte, tem área $A = 100{,}0\ cm^2$ a uma temperatura de 100 °C. A uma temperatura de 0,0 °C, qual será a área da chapa em cm^2? Considere que o coeficiente de expansão linear do material é $\alpha = 2{,}0 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$.

a) 74,0 b) 64,0 c) 54,0 d) 44,0 e) 34,0

T. 60 (Unic-MT) Uma chapa de alumínio tem um furo central de 100 cm de raio, estando numa temperatura de 12 °C.

Sabendo-se que $\alpha_{A\ell} = 22 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$, a nova área do furo quando a chapa for aquecida até 122 °C será:

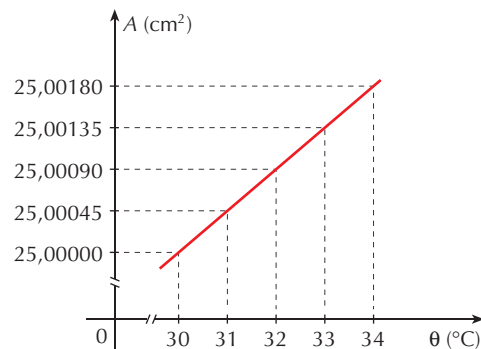
a) $2{,}425\ m^2$
b) $3{,}140\ m^2$
c) $4{,}155\ m^2$
d) $3{,}155\ m^2$
e) $5{,}425\ m^2$

T. 61 (Mackenzie-SP) Uma esfera de certa liga metálica, ao ser aquecida de 100 °C, tem seu volume aumentado de 4,5%. Uma haste dessa mesma liga metálica, ao ser aquecida de 100 °C, terá seu comprimento aumentado de:

a) 1,0% b) 1,5% c) 2,0% d) 3,0% e) 4,5%

T. 62 (Mackenzie-SP) Uma haste homogênea é constituída de um certo material e possui comprimento L_0 a uma temperatura inicial θ_0. Após ser aquecida até a temperatura θ, o comprimento da haste aumenta de 0,20%. Uma placa de $2{,}50 \cdot 10^3\ cm^2$, à temperatura θ_0 e constituída do mesmo material da haste, é também aquecida. Ao sofrer a mesma variação de temperatura da haste, a área da placa passará a ser:

a) $2{,}51 \cdot 10^3\ cm^2$
b) $2{,}55 \cdot 10^3\ cm^2$
c) $2{,}60 \cdot 10^3\ cm^2$
d) $3{,}50 \cdot 10^3\ cm^2$
e) $3{,}60 \cdot 10^3\ cm^2$

T. 63 (UFC-CE) Numa experiência de laboratório sobre dilatação superficial, foram feitas várias medidas da área A da superfície de uma lâmina circular de vidro em função da temperatura θ. Os resultados das medidas estão representados no gráfico abaixo.

Com base nos dados experimentais fornecidos no gráfico, pode-se afirmar, corretamente, que o valor numérico do coeficiente de dilatação linear do vidro é:

a) $24 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
b) $18 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
c) $12 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
d) $9 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$
e) $6 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$

T. 64 Um paralelepípedo a 20 °C tem volume de 6 ℓ, sendo constituído de um material cujo coeficiente de dilatação linear é $8 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1}$. Quando sua temperatura aumenta para 120 °C, o acréscimo de volume, em cm^3, é:

a) 144
b) 72,0
c) 14,4
d) 9,60
e) 4,80

T. 65 (Fuvest-SP) Um termômetro especial, de líquido dentro de um recipiente de vidro, é constituído de um bulbo de 1 cm^3 e um tubo com secção transversal de 1 mm^2. À temperatura de 20 °C, o líquido preenche completamente o bulbo até a base do tubo. À temperatura de 50 °C, o líquido preenche o tubo até uma altura de 12 mm.

Considere desprezíveis os efeitos da dilatação do vidro e da pressão do gás acima da coluna do líquido. Podemos afirmar que o coeficiente de dilatação volumétrica médio do líquido vale:

a) $3 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$
b) $4 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$
c) $12 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$
d) $20 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$
e) $36 \times 10^{-4}\ °C^{-1}$

T. 66 (Ufal) Um recipiente cúbico de zinco, de coeficiente de dilatação térmica linear $25 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}, tem lado 20 cm à temperatura de 20 °C. Nessa temperatura ele é preenchido completamente com mercúrio, de coeficiente de dilatação $180 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. O sistema é levado, então, à temperatura final de 120 °C. Analise as afirmações.

01) O coeficiente de dilatação da superfície lateral do cubo é $50 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

02) A dilatação apresentada pelo lado do cubo é 20 cm.

04) A dilatação apresentada pelo recipiente é 20 cm^3.

08) A dilatação do mercúrio é 144 cm^3.

16) Certamente ocorreu transbordamento maior que 100 cm^3 de mercúrio.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 67 (UCSal-BA) Um recipiente de volume *V* está repleto de um líquido a 20 °C. Aquecendo-se o conjunto a 50 °C, transbordam 2,0 cm^3 do líquido. Esses 2,0 cm^3 correspondem:

a) à dilatação real do líquido.

b) à dilatação aparente do líquido.

c) à soma da dilatação real com a dilatação aparente do líquido.

d) à diferença entre a dilatação real e a dilatação aparente do líquido.

e) a três vezes a dilatação real do líquido.

T. 68 (Mackenzie-SP) Em uma experiência para determinarmos o coeficiente de dilatação linear do vidro, tomamos um frasco de vidro de volume 1.000 cm^3 e o preenchemos totalmente com mercúrio (coeficiente de dilatação volumétrica = $1,8 \cdot 10^{-4}$ °C^{-1}). Após elevarmos a temperatura do conjunto de 100 °C, observamos que 3,0 cm^3 de mercúrio transbordam. Dessa forma, podemos afirmar que o coeficiente de dilatação linear do vidro que constitui esse frasco vale:

a) $5,0 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}

b) $4,0 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}

c) $3,0 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}

d) $2,0 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}

e) $1,0 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}

T. 69 (UFRN) Suponha um recipiente com capacidade de 1,0 litro cheio com um líquido que tem o coeficiente de dilatação volumétrica duas vezes maior que o coeficiente do material do recipiente (dado: coeficiente de dilatação volumétrica do líquido = $2 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}).
Qual a quantidade de líquido que transbordará quando o conjunto sofrer uma variação de temperatura de 30 °C?

a) 0,01 cm^3 c) 0,30 cm^3 e) 1,00 cm^3
b) 0,09 cm^3 d) 0,60 cm^3

T. 70 (UEG-GO) A dilatação dos líquidos obedece — quando o intervalo da temperatura não é muito grande — às mesmas leis de dilatação dos sólidos. Qualquer líquido assume a forma do recipiente que o contém e ambos dilatam conforme as mesmas leis. Sendo assim, a dilatação do líquido é medida indiretamente. Em um automóvel, o coeficiente de dilatação do tanque é 63×10^{-6} °C^{-1} e o coeficiente de dilatação real da gasolina é $9,6 \times 10^{-4}$ °C^{-1}.
Com base nessas informações, assinale a alternativa correta.

a) Se uma pessoa enche o tanque de combustível do seu carro em um dia quente, à noite haverá derramamento de combustível devido à redução no volume do tanque.

b) Enchendo o tanque em um dia extremamente quente, essa pessoa terá um lucro considerável porque o combustível estará dilatado.

c) O coeficiente de dilatação aparente da gasolina é $7,26 \times 10^{-5}$ °C^{-1}.

d) Para uma variação de 10 °C na temperatura de 100 litros de gasolina, há um aumento de volume igual a 0,063 litro.

e) O volume extravasado de um tanque de gasolina totalmente cheio com 200 litros é aproximadamente 4,48 litros, quando há um aumento de temperatura de 25 °C.

T. 71 (Unifor-CE) Um recipiente de vidro com capacidade de 1.000 cm^3 contém 980 cm^3 de glicerina, na temperatura de 20 °C. Aquecendo o conjunto até a temperatura θ, verifica-se que a glicerina começa a transbordar (dados: coeficiente de dilatação volumétrica da glicerina = $48 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}; coeficiente de dilatação linear do vidro = $9,0 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}). Na escala Celsius, o valor de θ é mais próximo de:

a) 120 b) 90 c) 80 d) 65 e) 25

Capítulo 4

Calor: energia térmica em trânsito

Em uma lareira, a energia térmica obtida na combustão da lenha é transferida ao ambiente, cuja temperatura é menor que a sua. O calor propaga-se em todo o ambiente proporcionando o aumento da temperatura.

Os efeitos do calor sobre os corpos fazem parte do nosso cotidiano e podem ser facilmente percebidos. A ideia de que o calor é uma forma de energia foi estabelecida no final do século XIX, quando se passou a considerar o calor como energia térmica em trânsito entre corpos de diferentes temperaturas.

Seção 4.1

Calor: energia térmica em trânsito

Objetivos

- Conceituar calor.
- Diferenciar calor sensível e calor latente.

Termos e conceitos

- caloria

Considere dois corpos *A* e *B* em diferentes temperaturas, θ_A e θ_B, tais que $\theta_A > \theta_B$ (**fig. 1A**). Colocando-os em presença um do outro, verifica-se que a energia térmica é transferida de *A* para *B*. Essa **energia térmica em trânsito** é denominada **calor**. A passagem do calor cessa ao ser atingido o equilíbrio térmico, isto é, quando as temperaturas se igualam (**fig. 1B**).

B $\theta'_A = \theta'_B$ (equilíbrio térmico)

θ'_A θ'_B

A B

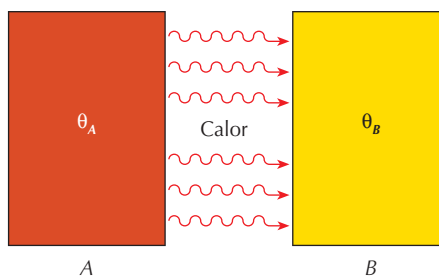



Figura 1. O corpo *A* cede calor ao corpo *B*, até as temperaturas se igualarem.

> **Calor** é energia térmica em trânsito entre corpos a **diferentes temperaturas**.

O chá quente está a uma temperatura maior que a das mãos que seguram a xícara, fornecendo calor a elas.

Estando a água à temperatura ambiente, o calor se propaga da água para o gelo.

Como vimos no Capítulo 1, a unidade em que é medida a quantidade de calor Q trocada pelos corpos é a unidade de energia, visto que se trata de energia térmica em trânsito. Assim, no Sistema Internacional, a unidade de quantidade de calor é o **joule (J)**. Entretanto, por razões históricas, existe outra unidade, a **caloria (cal)**, cuja relação com o joule é:

$$1 \text{ cal} = 4{,}1868 \text{ J}^{*}$$

Um múltiplo da caloria bastante utilizado é a **quilocaloria (kcal)**:

$$1 \text{ kcal} = 1.000 \text{ cal}$$

Calor sensível e calor latente

Se levarmos ao fogo água líquida na temperatura ambiente (**fig. 2**), logo verificaremos pelo termômetro que ela se aquece, isto é, sofre uma elevação de temperatura. Se, entretanto, fizermos o mesmo com um bloco de gelo a 0 °C (**fig. 3**), verificaremos que ele se derrete, isto é, se transforma em líquido, mas sua temperatura não se modifica até que todo o gelo se derreta.

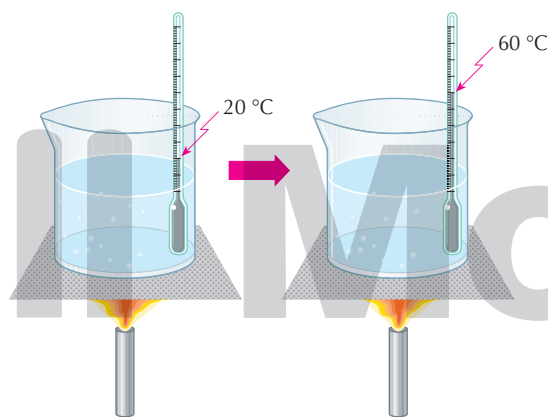



Figura 2. A água líquida se aquece ao ser levada ao fogo.

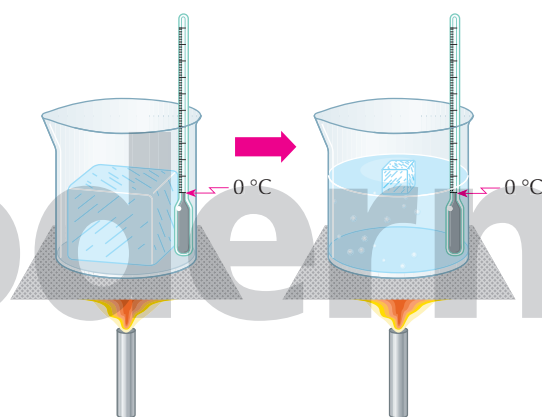



Figura 3. Em presença do fogo, o gelo a 0 °C se derrete, não sofrendo variação de temperatura.

Portanto, quando um corpo recebe calor, este pode produzir **variação de temperatura** ou **mudança de estado**. Quando o efeito produzido é a variação de temperatura, dizemos que o corpo recebeu **calor sensível**. Se o efeito se traduz pela mudança de estado, o calor recebido pelo corpo é dito **calor latente**. Nos exemplos citados, a água líquida recebeu calor sensível e o gelo recebeu calor latente.

De modo análogo, quando um corpo cede calor, se houver diminuição de temperatura, diz-se que o corpo perdeu calor sensível; se houver mudança de estado, o corpo terá perdido calor latente.

Neste capítulo analisaremos apenas situações em que os corpos trocam calor sensível, isto é, situações em que não ocorrem mudanças de estado. As trocas de calor latente serão analisadas no capítulo seguinte, quando do estudo das mudanças de fase.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
História da Física: *A evolução do conceito de calor*
Vídeo: *Calor sensível e calor latente*

* Na leitura sobre a experiência de Joule, neste capítulo (página 80), você saberá como essa correspondência foi obtida pela primeira vez.

Seção 4.2

Quantidade de calor sensível. Equação fundamental da Calorimetria. Calor específico

Objetivos

- Relacionar a quantidade de calor recebido ou cedido por um corpo com a variação da temperatura, com a massa e com o material do qual o corpo é feito.
- Enunciar a equação fundamental da Calorimetria.
- Conceituar calor específico, capacidade térmica e equivalente em água de um corpo.

Termos e conceitos

- calor recebido
- calor cedido

Considere uma esfera *A* de ferro, que é aquecida, recebendo 220 calorias. Sua temperatura se eleva de 20 °C (**fig. 4A**). Outra esfera *B*, idêntica à primeira, à mesma temperatura inicial θ_i, é aquecida por uma fonte mais intensa, recebendo uma quantidade de calor três vezes superior, isto é, 660 calorias. Com isso, sua temperatura se eleva de 60 °C (**fig. 4B**).

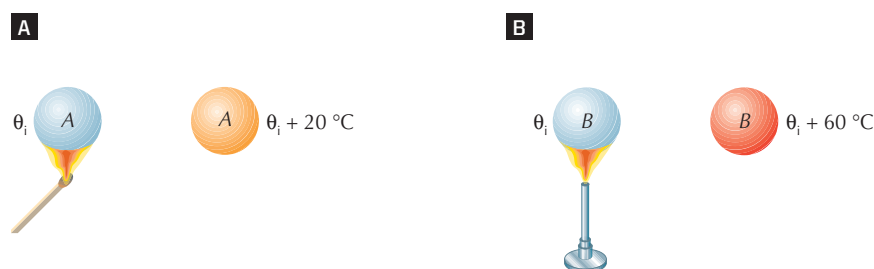



Figura 4. **O corpo *B* recebe maior quantidade de calor e, por isso, sofre maior variação de temperatura.**

Estudos comprovam que essa proporcionalidade é válida para corpos de qualquer material. Assim, de modo geral, podemos enunciar:

> As quantidades de calor *Q* recebidas (ou cedidas) por corpos de mesmo material e de mesma massa são diretamente proporcionais às variações de temperatura $\Delta\theta$.

Considere agora duas esferas *C* e *D* de mesmo material (ferro), mas de massas diferentes (por exemplo, $m_C = 100$ gramas e $m_D = 300$ gramas, isto é, $m_D = 3m_C$). Para que sofram a mesma variação de temperatura ($\Delta\theta = 20$ °C, por exemplo) essas esferas (**fig. 5**) devem receber quantidades de calor diferentes (por exemplo, *C* recebe $Q_C = 220$ calorias e *D* recebe $Q_D = 660$ calorias, isto é, $Q_D = 3Q_C$):

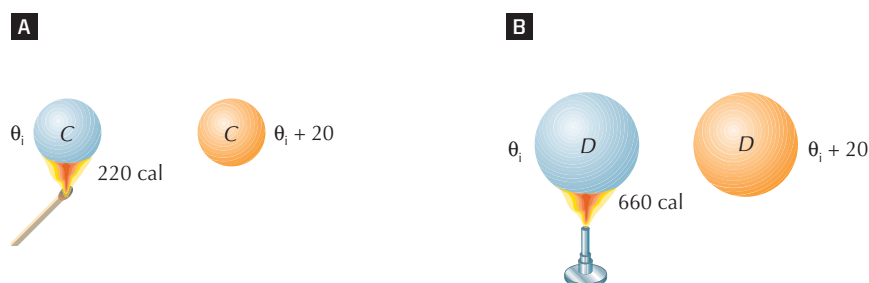



Figura 5. **O corpo *D* recebeu maior quantidade de calor para sofrer a mesma variação de temperatura que o corpo *C*.**

> As quantidades de calor recebidas (ou cedidas) por corpos de mesmo material e de massas diferentes, sujeitos à mesma variação de temperatura, são diretamente proporcionais às massas.

Resumindo as conclusões anteriores, podemos enunciar:

A quantidade de calor Q recebida (ou cedida) por um corpo é diretamente proporcional à sua massa m e à variação de temperatura $\Delta\theta$ sofrida pelo corpo.

Assim:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta}$$

Nessa fórmula, conhecida como **equação fundamental da Calorimetria**, o coeficiente de proporcionalidade ***c*** é uma **característica do material** que constitui o corpo, denominada **calor específico**. Sua unidade usual é cal/g · °C, como se deduz a partir da equação anterior.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\theta}}^{*} \left(\text{unidade}: \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot °\text{C}}\right)$$

Observe que, se $m = 1$ g e $\Delta\theta = 1$ °C, $c = Q$ (numericamente), isto é, o calor específico de uma substância mede numericamente a quantidade de calor que faz variar em 1 °C a temperatura da massa de 1 g da substância.

Vejamos um exemplo. O calor específico do ferro vale 0,11 cal/g · °C; portanto, para elevar em 1 °C a temperatura da massa de 1 g de ferro, devemos fornecer a essa massa 0,11 cal.

Substâncias diferentes apresentam diferentes calores específicos. A água é uma das substâncias de maior calor específico na natureza. De modo geral, os metais apresentam baixo calor específico. Veja estes exemplos:

Latão: 0,092 cal/g · °C **Prata:** 0,056 cal/g · °C **Ouro:** 0,032 cal/g · °C

Para uma dada substância, o calor específico depende do estado de agregação. Tomando como exemplo a água, temos os seguintes valores para o calor específico, de acordo com cada estado físico:

Gelo: 0,50 cal/g · °C **Água líquida:** 1,00 cal/g · °C **Vapor d'água****: 0,48 cal/g · °C

Quando a temperatura de um corpo aumenta, significa que ele recebeu calor. Se a temperatura de um corpo diminui, é porque ele cedeu calor. Essa diferença é analisada de acordo com o seguinte critério:

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$$

Aumento de temperatura → Calor recebido

$$\theta_f > \theta_i \Rightarrow \Delta\theta > 0 \Rightarrow Q > 0$$

Diminuição de temperatura → Calor cedido

$$\theta_f < \theta_i \Rightarrow \Delta\theta < 0 \Rightarrow Q < 0$$

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *As calorias dos alimentos*

* O calor específico definido por essa fórmula é um valor médio para o intervalo de temperatura $\Delta\theta$. O calor específico a uma dada temperatura é dado pelo limite dessa expressão, quando $\Delta\theta$ tende a zero. A rigor, o calor específico de uma substância depende da temperatura. Em nosso curso, não levaremos em conta essa variação.

** Sob pressão de 1 atmosfera e a 110 °C de temperatura.

Capacidade térmica de um corpo

Considere que a temperatura de um corpo sofra uma variação de temperatura $\Delta\theta$, ao receber certa quantidade de calor Q. Define-se **capacidade térmica *C*** desse corpo a grandeza dada pela fórmula:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta}$$

A unidade usual de capacidade térmica é a **caloria por grau Celsius (cal/°C)**.

Vamos supor que, ao receber 2.000 calorias (Q = 2.000 cal), a temperatura de um bloco metálico aumente de 20 °C para 420 °C, tendo ocorrido a variação de temperatura $\Delta\theta$ = 420 °C − 20 °C = 400 °C. A capacidade térmica desse bloco será dada por:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta} \Rightarrow C = \frac{2.000}{400} \Rightarrow C = 5 \text{ cal/°C}$$

A capacidade térmica representa numericamente a quantidade de calor que o corpo deve trocar para sofrer uma variação unitária de temperatura. No exemplo, o corpo deve receber 5 calorias para que sua temperatura varie de 1 grau Celsius.

O nome dessa grandeza (capacidade térmica) vem do seguinte fato: ela pode ser entendida como a medida da **capacidade de receber ou perder calor** que um corpo apresenta, para uma dada variação de temperatura. Um corpo de baixa capacidade térmica troca quantidades de calor relativamente pequenas para sofrer uma dada variação de temperatura. As fagulhas de um esmeril, por exemplo, apresentam alta temperatura, mas não queimam a pele do operador porque têm pequena capacidade térmica — isto é, elas cedem pouco calor até que o equilíbrio térmico se estabeleça.

Substituindo, na fórmula de definição da capacidade térmica, a quantidade de calor expressa pela equação fundamental de calorimetria ($Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$), teremos:

$$C = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\theta}{\Delta\theta} \Rightarrow \boxed{C = mc}$$

Portanto, a capacidade térmica de um corpo também pode ser expressa como o produto de sua massa (m) pelo calor específico da substância que o constitui (c).

Chama-se **equivalente em água** de um corpo a massa de água cuja capacidade térmica é igual à capacidade térmica do corpo. Por exemplo, seja C = 5 cal/°C a capacidade térmica de um corpo. Sendo o calor específico da água c_a = 1 cal/g · °C, concluímos que o equivalente em água do corpo é m_a = 5 g.

Mesmo sem luvas, o operador não tem suas mãos queimadas pelas fagulhas por estas terem baixa capacidade térmica.

Por que as gotas de óleo que espirram da frigideira queimam as mãos do cozinheiro?

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 20 Um corpo de massa 200 g é constituído por uma substância de calor específico 0,4 cal/g · °C. Determine:

a) a quantidade de calor que o corpo deve receber para que sua temperatura varie de 5 °C para 35 °C;

b) que quantidade de calor deve ceder para que sua temperatura diminua de 15 °C;

c) a capacidade térmica do corpo.

Solução:

a) Para a temperatura aumentar de $\theta_i = 5$ °C para $\theta_f = 35$ °C ($\theta_f > \theta_i$), o corpo deve receber calor ($Q > 0$):

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i = 35 - 5 \Rightarrow \Delta\theta = 30\ °C$$

Substituindo esse valor ($\Delta\theta = 30$ °C) e os demais dados ($m = 200$ g; $c = 0{,}4$ cal/g · °C) na equação fundamental da Calorimetria, obtemos:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 0{,}4 \cdot 30 \Rightarrow \boxed{Q = 2.400\ \text{cal}}$$

b) Para a temperatura diminuir ($\theta_f < \theta_i$), o corpo deve ceder calor ($Q < 0$).
Sendo $\Delta\theta = -15$ °C, $m = 200$ g e $c = 0{,}4$ cal/g · °C, temos:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 0{,}4 \cdot (-15) \Rightarrow \boxed{Q = -1.200\ \text{cal}}$$

O sinal negativo indica calor cedido.

c) Podemos calcular a capacidade térmica do corpo pela fórmula $C = \frac{Q}{\Delta\theta}$.

Como $Q = 2.400$ cal para $\Delta\theta = 30$ °C, vem:

$$C = \frac{2.400}{30} \Rightarrow \boxed{C = 80\ \text{cal/°C}}$$

Outra alternativa é utilizar a fórmula $C = mc$, sendo $m = 200$ g e $c = 0{,}4$ cal/g · °C:

$$C = 200 \cdot 0{,}4 \Rightarrow \boxed{C = 80\ \text{cal/°C}}$$

Respostas: a) 2.400 calorias; b) 1.200 calorias; c) 80 cal/°C

R. 21 A temperatura de 100 g de um líquido cujo calor específico é 0,5 cal/g · °C sobe de −10 °C até 30 °C. Em quantos minutos será realizado esse aquecimento com uma fonte que fornece 50 calorias por minuto?

Solução:

A temperatura varia de $\theta_i = -10$ °C para $\theta_f = 30$ °C. Logo, a variação de temperatura é:

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i = 30\ °C - (-10\ °C) = 40\ °C$$

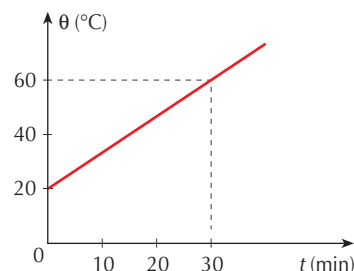
São dados: $m = 100$ g; $c = 0{,}5$ cal/g · °C. A quantidade de calor Q recebida pelo corpo vale:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 100 \cdot 0{,}5 \cdot 40 \Rightarrow Q = 2.000\ \text{cal}$$

A fonte fornece 50 cal/min (fluxo ou potência da fonte). Assim, por regra de três simples e direta:

$$\left.\begin{array}{l} 50\ \text{cal} \text{ — } 1\ \text{min} \\ 2.000\ \text{cal} \text{ — } x \end{array}\right\} x = \frac{2.000}{50} \Rightarrow \boxed{x = 40\ \text{min}}$$

Resposta: 40 min

R. 22 Um corpo de massa 200 g é aquecido por uma fonte de potência constante e igual a 200 calorias por minuto. O gráfico mostra como varia, no tempo, a temperatura do corpo. Determine a capacidade térmica do corpo e o calor específico da substância que o constitui.

Solução:
Os dados para a solução do exercício são extraídos do gráfico. A temperatura do corpo variou de 20 °C para 60 °C em 30 min.

$$\Delta\theta = 60\ °C - 20\ °C = 40\ °C$$

O calor fornecido pela fonte pode ser calculado por regra de três simples e direta:

$$\left.\begin{array}{l} 1\ \text{min} \longrightarrow 200\ \text{cal} \\ 30\ \text{min} \longrightarrow Q \end{array}\right\} Q = 6.000\ \text{cal}$$

A capacidade térmica do corpo será dada por:

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta} \Rightarrow C = \frac{6.000}{40} \Rightarrow \boxed{C = 150\ \text{cal/°C}}$$

O calor específico da substância pode ser calculado a partir da equação fundamental ($Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$):

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\theta} \left\{\begin{array}{l} Q = 6.000\ \text{cal} \\ m = 200\ \text{g} \\ \Delta\theta = 40\ °C \end{array}\right\} c = \frac{6.000}{200 \cdot 40} \Rightarrow \boxed{c = 0{,}75\ \text{cal/g} \cdot °C}$$

O calor específico também pode ser obtido pela relação:

$$c = \frac{C}{m} \Rightarrow c = \frac{150}{200} \Rightarrow \boxed{c = 0{,}75\ \text{cal/g °C}}$$

Resposta: 150 cal/°C e 0,75 cal/g · °C

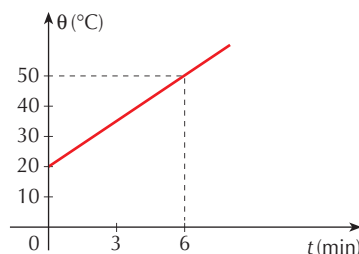
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 50 Um corpo de massa 50 g recebe 300 cal e sua temperatura sobe de −10 °C até 20 °C. Determine a capacidade térmica do corpo e o calor específico da substância que o constitui.

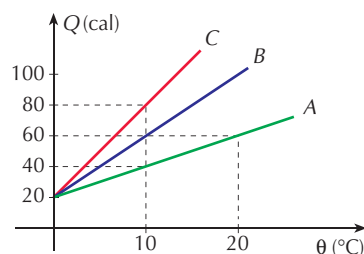
P. 51 Um quilograma de glicerina, de calor específico 0,6 cal/g · °C, inicialmente a −30 °C, recebe 12.000 cal de uma fonte. Determine a temperatura final da glicerina.

P. 52 Uma fonte térmica fornece, em cada minuto, 20 cal. Para produzir um aquecimento de 30 °C em 50 g de um líquido, são necessários 15 min. Determine o calor específico do líquido e a capacidade térmica dessa quantidade de líquido.

P. 53 Para sofrer determinada variação de temperatura, um bloco metálico deve permanecer 3 min em presença de uma fonte de fluxo constante. A mesma massa de água, para sofrer a mesma variação de temperatura, exige 12 min em presença da fonte (calor específico da água: $c = 1$ cal/g · °C). Determine o calor específico do metal.

P. 54 Um corpo é colocado em presença de uma fonte térmica de fluxo 2 cal/s. O gráfico do aquecimento em função do tempo, em minutos, é o apresentado. Sendo 60 g a massa do corpo, determine sua capacidade térmica e o calor específico do material que o constitui.

P. 55 O gráfico fornece a quantidade de calor absorvida por três corpos A, B e C em função da temperatura. Calcule, para cada um dos corpos, a capacidade térmica e o calor específico das substâncias que os constituem. São dadas as massas: $m_A = m_B = 20$ g e $m_C = 10$ g.

Seção 4.3

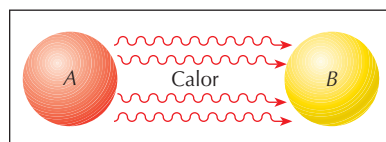
Trocas de calor. Calorímetro

Objetivos

- Analisar o funcionamento de um calorímetro e as trocas de calor entre corpos em seu interior.
- Enunciar e aplicar o princípio geral das trocas de calor.

Termos e conceitos

- **calorímetro**

Dois corpos A e B são colocados num recinto termicamente isolado. Se a temperatura de A é maior que a de B, há transferência de calor do primeiro para o segundo, até que se estabeleça o equilíbrio térmico (**fig. 6**). Como não há outros corpos trocando calor, se A perder, por exemplo, 50 cal nesse intervalo de tempo, B terá recebido exatamente 50 cal. Pela convenção de sinais estabelecida:

$$Q_A = -50 \text{ cal} \qquad Q_B = 50 \text{ cal}$$

$\theta_A > \theta_B$: A cede calor para B

$\theta'_A = \theta'_B$: equilíbrio térmico

Figura 6. **Os corpos A e B trocam calor até atingir o equilíbrio térmico.**

Percebe-se que:

$$Q_A = -Q_B \quad \text{ou} \quad Q_A + Q_B = 0$$

Podemos então enunciar o princípio geral que descreve as trocas de calor:

> Se dois ou mais corpos trocam calor entre si, a soma algébrica das quantidades de calor trocadas pelos corpos, até o estabelecimento do equilíbrio térmico, é nula.

Geralmente, os corpos que trocam calor são colocados no interior de dispositivos especiais denominados **calorímetros**, isolados termicamente do meio exterior. O mais usado é o calorímetro de mistura, apresentado na foto a seguir e ilustrado em corte (**fig. 7**).

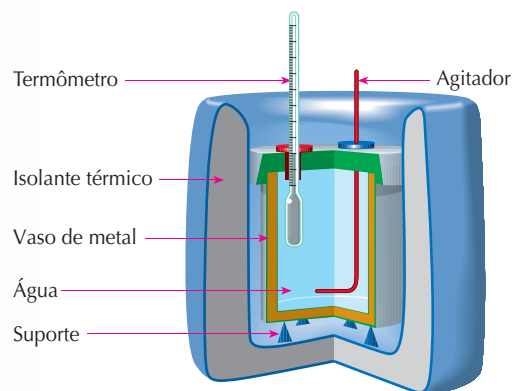



Figura 7. **Corte de um calorímetro de mistura.**

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Simulador: *Calorímetro*

O calorímetro participa das trocas de calor, embora na maioria dos casos essa participação seja pouco acentuada. No entanto, quando o calorímetro absorve uma quantidade de calor considerável, devemos levar em conta sua **capacidade térmica** *C*, expressa pela relação entre o calor absorvido *Q* e a variação de temperatura $\Delta\theta$ que ele sofre $\left(C = \frac{Q}{\Delta\theta}\right)$.

Por exemplo: se numa variação de temperatura de 20 °C o calorímetro absorve 60 cal, sua capacidade térmica vale:

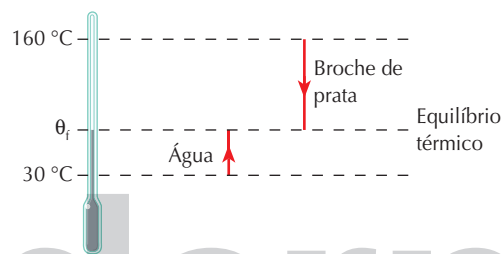
$$\left.\begin{matrix} Q = 60 \text{ cal} \\ \Delta\theta = 20 \text{ °C} \end{matrix}\right\} C = \frac{Q}{\Delta\theta} = \frac{60}{20} \Rightarrow C = 3 \text{ cal/ °C}$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 23 Um broche de prata de massa 20 g a 160 °C é colocado em 28 g de água inicialmente a 30 °C. Qual será a temperatura final de equilíbrio térmico, admitindo trocas de calor apenas entre a prata e a água?
(Dados: calor específico da prata = 0,056 cal/g · °C; calor específico da água = 1,0 cal/g · °C)

Solução:
A temperatura final θ_f de equilíbrio térmico deve ter um valor intermediário entre 30 °C e 160 °C. A água recebe calor, sua temperatura aumentando de 30 °C para θ_f. A prata perde calor, sua temperatura diminuindo de 160 °C para θ_f. Esquematicamente, as variações de temperatura são as apresentadas ao lado.

Para facilitar os cálculos, é recomendável dispor os dados do problema em uma tabela:

	m	*c* (cal/g · °C)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
Água	28 g	1,0	30 °C	*x* = ?	*x* − 30
Broche de prata	20 g	0,056	160 °C	*x* = ?	*x* − 160

Calculemos as quantidades de calor trocadas.

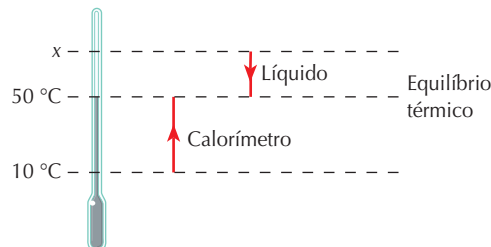
1) Calor recebido pela água: $Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 28 \cdot 1{,}0\,(x - 30) \Rightarrow Q_1 = 28x - 840$
2) Calor perdido pelo broche de prata: $Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 20 \cdot 0{,}056\,(x - 160) \Rightarrow Q_2 = 1{,}12x - 179{,}2$

De acordo com o princípio geral das trocas de calor, a soma das quantidades de calor trocadas é nula ($Q_1 + Q_2 = 0$). Logo:

$$28x - 840 + 1{,}12x - 179{,}2 = 0 \Rightarrow 29{,}12x - 1.019{,}2 = 0 \Rightarrow 29{,}12x = 1.019{,}2 \Rightarrow \boxed{x = 35 \text{ °C}}$$

Resposta: 35 °C

R. 24 Num calorímetro de capacidade térmica 8,0 cal/°C, inicialmente a 10 °C, são colocados 200 g de um líquido de calor específico 0,40 cal/g · °C. Verifica-se que o equilíbrio térmico se estabelece a 50 °C. Determine a temperatura inicial do líquido.

Solução:
A troca de calor se dá entre o calorímetro (que recebe) e o líquido (que perde). Esquematizando as variações de temperatura, teremos:

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/calorimetro/calorimetro.htm (acesso em julho/2009), você poderá simular um exercício de Calorimetria, calculando o valor do calor específico de um sólido ou o equivalente em água de um calorímetro, introduzindo dados no simulador e obtendo a resposta.

Dispondo os dados em uma tabela, para facilitar os cálculos:

	m	c (cal/g · °C)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
Calorímetro	8,0 cal/°C		10 °C	50 °C	40 °C
Líquido	200 g	0,40	x = ?	50 °C	50 − x

Calculemos as quantidades de calor trocadas.

1) Calor recebido pelo calorímetro: $Q_1 = C \cdot \Delta\theta = 8{,}0 \cdot 40 \Rightarrow Q_1 = 320$ cal

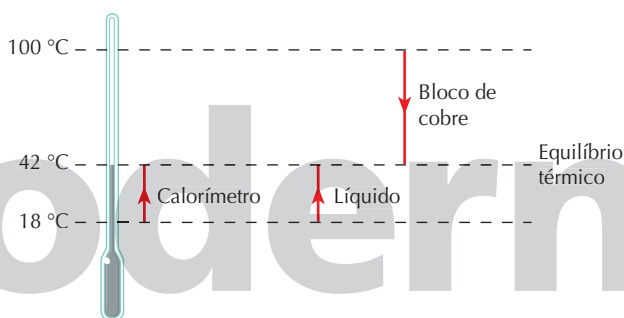
2) Calor perdido pelo líquido: $Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 0{,}40 \cdot (50 - x) \Rightarrow Q_2 = 4.000 - 80x$

Aplicando o princípio geral das trocas de calor ($Q_1 + Q_2 = 0$):

$$320 + 4.000 - 80x = 0 \Rightarrow 80x = 4.320 \Rightarrow x = \frac{4.320}{80} \Rightarrow \boxed{x = 54\ °C}$$

Resposta: 54 °C

R. 25 No interior de um calorímetro de capacidade térmica 6 cal/°C encontram-se 85 g de um líquido a 18 °C. Um bloco de cobre de massa 120 g e calor específico 0,094 cal/g · °C, aquecido a 100 °C, é colocado dentro do calorímetro. O equilíbrio térmico se estabelece a 42 °C. Determine o calor específico do líquido.

Solução:
Três corpos trocam calor entre si: o calorímetro, o líquido e o bloco de cobre. A temperatura do calorímetro aumenta de 18 °C para 42 °C; portanto, o calorímetro recebe calor. A temperatura do líquido também varia de 18 °C para 42 °C e, assim, o líquido recebe calor. O bloco de cobre sofre um abaixamento de temperatura de 100 °C para 42 °C; logo, o bloco perde calor.
Podemos indicar em um único esquema as variações de temperatura dos vários corpos, até se estabelecer o equilíbrio térmico, como apresentado ao lado.

Para facilitar os cálculos, convém dispor os dados em uma tabela:

	m	c (cal/g · °C)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
Calorímetro	C = 6 cal/°C		18 °C	42 °C	24 °C
Líquido	85 g	x = ?	18 °C	42 °C	24 °C
Bloco de cobre	120 g	0,094	100 °C	42 °C	−58 °C

Calculemos as quantidades de calor trocadas.

1) Calor recebido pelo calorímetro: $Q_1 = C \cdot \Delta\theta = 6 \cdot 24 \Rightarrow Q_1 = 144$ cal

2) Calor recebido pelo líquido: $Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 85 \cdot x \cdot 24 \Rightarrow Q_2 = 2.040x$

3) Calor perdido pelo bloco de cobre: $Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 120 \cdot 0{,}094 \cdot (-58) \Rightarrow Q_3 = -654{,}24$ cal

Pelo princípio geral das trocas de calor, é nula a soma das quantidades de calor trocadas ($Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$):

$$144 + 2.040x - 654{,}24 = 0 \Rightarrow 2.040x = 510{,}24 \Rightarrow \boxed{x \simeq 0{,}25\ \text{cal/g} \cdot °C}$$

Resposta: $\simeq$ 0,25 cal/g · °C

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Determinação da capacidade térmica de um calorímetro*

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 56 Colocam-se 500 g de ferro ($c = 0{,}1$ cal/g · °C) a 42 °C num recipiente de capacidade térmica desprezível contendo 500 g de água ($c = 1$ cal/g · °C) a 20 °C. Determine a temperatura final de equilíbrio térmico.

P. 57 Um bloco de alumínio ($c = 0{,}22$ cal/g · °C) de massa 100 g é deixado no interior de um forno até entrar em equilíbrio térmico com ele. Logo ao ser retirado, é colocado em 4.400 g de água ($c = 1$ cal/g · °C) a 30 °C. A temperatura de equilíbrio térmico é 32 °C. Determine a temperatura do forno.

P. 58 Num calorímetro cuja capacidade térmica é 5,0 cal/°C, inicialmente a 10 °C, são colocados 300 g de um líquido de calor específico 0,20 cal/g · °C na temperatura de 41 °C.

a) A que temperatura se estabelece o equilíbrio térmico?

b) Em seguida, coloca-se no calorímetro um bloco metálico de massa 500 g a 200 °C e o novo equilíbrio térmico se estabelece a 60 °C. Qual é o calor específico do metal de que é feito o bloco?

P. 59 (ITA-SP) Na determinação do calor específico de um metal, aqueceu-se uma amostra de 50 g desse metal a 98 °C e a amostra aquecida foi rapidamente transferida para um calorímetro de cobre bem isolado. O calor específico do cobre é 0,093 cal/g · °C e a massa de cobre no calorímetro é de 150 g. No interior do calorímetro há 200 g de água, cujo calor específico é 1,0 cal/g · °C. A temperatura do calorímetro e da água antes de receber a amostra aquecida era de 21,0 °C. Após receber a amostra, e restabelecido o equilíbrio térmico, a temperatura atingiu 24,6 °C. Determine o calor específico do metal em questão.

P. 60 (Mackenzie-SP) Um calorímetro de capacidade térmica 40 cal/°C contém 110 g de água (calor específico = 1 cal/g · °C) a 90 °C. Que massa de alumínio (calor específico = 0,2 cal/g · °C), a 20 °C, devemos colocar nesse calorímetro para esfriar a água a 80 °C?

P. 61 Um bloco de cobre ($c = 0{,}095$ cal/g · °C) de massa 300 g é aquecido até a temperatura de 88 °C. A seguir é colocado em 548 g de água ($c = 1{,}0$ cal/g · °C), contidos em um calorímetro de alumínio ($c = 0{,}22$ cal/g · °C) que está à temperatura de 25 °C. O equilíbrio térmico se estabelece a 28 °C. Determine a massa do calorímetro.

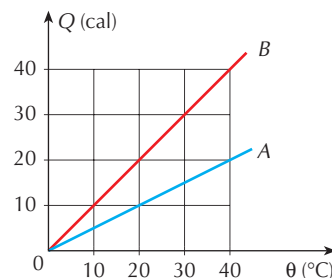
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 62 (F.M. Jundiaí-SP) A capacidade de um material absorver ou perder calor é uma propriedade característica desse material, conhecida como calor específico. A tabela fornece os valores do calor específico de alguns materiais, a 25 °C e 1 atm.

Material	Calor específico a 25 °C e 1 atm (J · g^{-1} · °C^{-1})
Água	4,18
Etanol	2,44
Ferro	0,45

a) Se iguais quantidades de água e de ferro ficarem expostas, durante o mesmo período de tempo, à mesma fonte de energia, qual ficará mais quente e alcançará temperatura mais elevada? Justifique.

b) Para que as mesmas quantidades de água e de etanol sofram a mesma variação de temperatura em igual intervalo de tempo, deve ser fornecida maior ou menor quantidade de calor para a água? Justifique.

P. 63 (UFPR) O gráfico mostrado na figura a seguir apresenta as quantidades de calor absorvidas por dois corpos A e B, cujas massas estão relacionadas por $m_B = 30\ m_A$, num intervalo em que a temperatura varia de 0 °C a 40 °C. Com base nesses dados, calcule a razão $\left(\frac{c_A}{c_B}\right)$ dos calores específicos das substâncias que compõem os corpos A e B, explicando como você obteve essa solução.

P. 64 (Fuvest-SP) Um recipiente de vidro de 500 g e calor específico 0,20 cal/g · °C contém 500 g de água cujo calor específico é 1,0 cal/g · °C. O sistema encontra-se isolado e em equilíbrio térmico. Quando recebe uma certa quantidade de calor, o sistema tem sua temperatura elevada. Determine:

a) a razão entre a quantidade de calor absorvida pela água e a recebida pelo vidro;

b) a quantidade de calor absorvida pelo sistema para uma elevação de 1,0 °C em sua temperatura.

P. 65 (UFPE) Considere que uma pequena boca de fogão a gás fornece tipicamente a potência de 250 cal/s. Supondo que toda a energia térmica fornecida é transmitida a 200 g de água, inicialmente a 30 °C, calcule o tempo, em segundos, necessário para que a água comece a ferver. Considere a pressão atmosférica de 1 atm e o calor específico da água igual a 1 cal/g · °C.

P. 66 (Fuvest-SP) Um recipiente contendo 3.600 g de água à temperatura inicial de 80 °C é posto num local onde a temperatura ambiente permanece sempre igual a 20 °C. Após 5 h o recipiente e a água entram em equilíbrio térmico com o meio ambiente. Durante esse período, ao final de cada hora, as seguintes temperaturas foram registradas para a água: 55 °C, 40 °C, 30 °C, 24 °C e 20 °C. Dado o calor específico da água (c = 1,0 cal/g · °C), pede-se:

a) um esboço indicando valores nos eixos do gráfico da temperatura da água em função do tempo;

b) em média, quantas calorias por segundo a água transferiu para o ambiente.

P. 67 (Unicamp-SP) Em um aquário de 10 ℓ, completamente cheio de água, encontra-se um pequeno aquecedor de 60 W. Sabendo-se que em 25 min a temperatura da água aumentou de 2 °C, pergunta-se:

a) Que quantidade de energia foi absorvida pela água?

b) Que fração da energia fornecida pelo aquecedor foi perdida para o exterior?

(Dados: calor específico da água = 1 cal/g · °C; densidade da água = 1 kg/ℓ; 1 cal = 4,0 J)

P. 68 (Unicamp-SP) Para resfriar um motor de automóvel, faz-se circular água por ele. A água entra no motor a uma temperatura de 80 °C com vazão de 0,4 ℓ/s, e sai a uma temperatura de 95 °C. A água quente é resfriada a 80 °C no radiador, voltando em seguida para o motor através de um circuito fechado.

a) Qual é a potência térmica absorvida pela água ao passar pelo motor? Considere o calor específico da água igual a 4.200 J/kg · °C e sua densidade igual a 1.000 kg/m³.

b) Quando um "aditivo para radiador" é acrescentado à água, o calor específico da solução aumenta para 5.250 J/kg · °C, sem mudança na sua densidade. Caso essa solução a 80 °C fosse injetada no motor em lugar da água, e absorvesse a mesma potência térmica, qual seria a sua temperatura na saída do motor?

P. 69 (Unicamp-SP) Um escritório tem dimensões iguais a 5 m × 5 m × 3 m e possui paredes bem isoladas. Inicialmente a temperatura no interior do escritório é de 25 °C. Chegam então as 4 pessoas que nele trabalham, e cada uma liga seu microcomputador. Tanto a pessoa como o microcomputador dissipam em média 100 W cada, na forma de calor. O aparelho de ar condicionado instalado tem a capacidade de diminuir em 5 °C a temperatura do escritório em meia hora, com as pessoas presentes e os micros ligados. A eficiência do aparelho é de 50%. Considere o calor específico do ar igual a 1.000 J/kg · °C e sua densidade igual a 1,2 kg/m³.

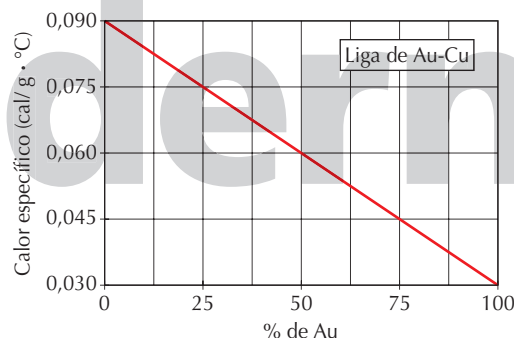
a) Determine a potência elétrica consumida pelo aparelho de ar condicionado.

b) O aparelho de ar condicionado é acionado automaticamente quando a temperatura do ambiente atinge 27 °C, abaixando-a para 25 °C. Quanto tempo depois da chegada das pessoas no escritório o aparelho é acionado?

P. 70 (Unicamp-SP) Desconfiada de que o anel que ganhara do namorado não era uma liga de ouro de boa qualidade, uma estudante resolveu tirar a dúvida, valendo-se de um experimento de calorimetria baseado no fato de que metais diferentes possuem diferentes calores específicos. Inicialmente, a estudante deixou o anel de 4,0 g por um longo tempo dentro de uma vasilha com água fervente (100 °C). Tirou, então, o anel dessa vasilha e o mergulhou em um outro recipiente, bem isolado termicamente, contendo 2,0 mℓ de água a 15 °C. Mediu a temperatura final da água em equilíbrio térmico com o anel. O calor específico da água é igual a 1,0 cal/g · °C, e sua densidade é igual a 1,0 g/cm³. Despreze a troca de calor entre a água e o recipiente.

a) Sabendo-se que o calor específico do ouro é c_{Au} = 0,03 cal/g · °C, qual deveria ser a temperatura final de equilíbrio se o anel fosse de ouro puro?

b) A temperatura final de equilíbrio medida pela estudante foi de 22 °C. Encontre o calor específico do anel.

c) A partir do gráfico e da tabela abaixo, determine qual é a porcentagem de ouro do anel e quantos quilates ele tem.

Liga de Au-Cu	
% de Au	**Quilates**
0	0
25	6
50	12
75	18
100	24

P. 71 (UFRJ) Em um calorímetro ideal, há 98 g de água à temperatura de 0 °C. Dois cubinhos metálicos são introduzidos no calorímetro. Um deles tem massa 8,0 g, calor específico 0,25 cal/g · °C e está à temperatura de 400 °C. O outro tem 10 g de massa, calor específico 0,20 cal/g · °C e está à temperatura de 100 °C. Posteriormente, esse último cubinho é retirado do calorímetro e verifica-se, nesse instante, que sua temperatura é 50 °C. Calcule a temperatura final de equilíbrio da água e do cubinho que permanece no calorímetro (dado: $c_{água}$ = 1,0 cal/g · °C).

P. 72 (Vunesp) Uma zelosa "mãe de primeira viagem" precisa preparar o banho do recém-nascido, mas não tem termômetro. Seu pediatra disse que a temperatura ideal para o banho é de 38 °C. Ela mora à beira-mar e acabou de ouvir, pelo rádio, que a temperatura ambiente é 32 °C. Como boa estudante de Física, resolve misturar água fervente com água à temperatura ambiente, para obter a temperatura desejada.

a) Enuncie o princípio físico em que se baseia o seu procedimento.

b) Suponha que ela dispõe de uma banheira com 10 litros de água à temperatura ambiente. Calcule qual é, aproximadamente, o volume de água fervente que ela deve misturar à água da banheira para obter a temperatura ideal. Admita desprezível o calor absorvido pela banheira e que a água não transborde.

P. 73 (UFG-GO) Um biólogo, querendo verificar se estava correta a temperatura indicada por sua estufa, fez a seguinte experiência:

1. Colocou um objeto metálico na estufa. Após o equilíbrio térmico, colocou o objeto em uma garrafa térmica (calorímetro de capacidade térmica desprezível) contendo 100 g de água a 20 °C. Mediu a temperatura de equilíbrio entre o objeto e a água e encontrou 31 °C.
2. Colocou novamente na estufa dois objetos metálicos idênticos ao anterior. Após o equilíbrio térmico, colocou-os na garrafa térmica, contendo, novamente, 100 g de água a 20 °C. Mediu a nova temperatura de equilíbrio térmico entre os dois objetos e a água e encontrou 40 °C.

Admitindo-se que o indicador de temperatura da estufa estivesse funcionando corretamente, qual deveria ser a temperatura indicada na estufa?

P. 74 (UFU-MG) As temperaturas iniciais de uma massa m de um líquido A, $2m$ de um líquido B e $3m$ de um líquido C são respectivamente iguais a 60 °C, 40 °C e 20 °C. Misturando-se os líquidos A e C, a temperatura de equilíbrio é 30 °C; misturando-se os líquidos B e C, a temperatura de equilíbrio é 25 °C.

a) Qual é a temperatura de equilíbrio, quando se misturam os líquidos A e B?

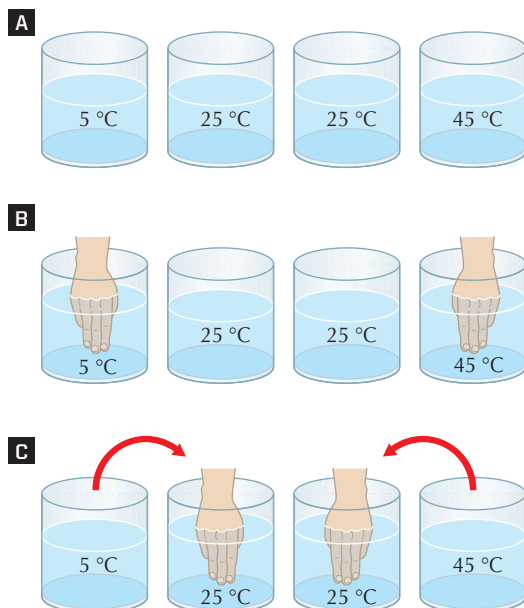
b) Se o calor específico do líquido C é 0,5 cal/g · °C, qual é o calor específico do líquido B?

TESTES PROPOSTOS

T. 72 (UEPB) Considere a seguinte situação:
Um aluno pegou quatro recipientes contendo água em temperaturas variadas. Em seguida mergulhou uma das mãos no recipiente com água fria (5 °C) e a outra mão no recipiente com água morna (45 °C). Após dois minutos, retirou-as e mergulhou imediatamente em outros dois recipientes com água a temperatura ambiente (25 °C), conforme a ilustração abaixo. Lembre-se de que a temperatura do corpo humano é de aproximadamente 36 °C.

A

B

C

Com base no exposto, julgue as afirmações a seguir.

I. No recipiente com água fria ocorre transferência de energia na forma de frio da água fria para a mão; e no recipiente com água morna ocorre transferência de energia na forma de calor da água morna para a mão.

II. No recipiente com água fria ocorre transferência de energia na forma de calor da mão para a água fria; e no recipiente com água morna ocorre transferência de energia na forma de calor da água morna para a mão.

III. No recipiente com água fria ocorre transferência de energia na forma de trabalho da água fria para a mão; e no recipiente com água morna ocorre transferência de energia na forma de calor da água morna para a mão.

IV. No passo **B** (ver ilustração), a mão que sente a maior diferença de temperatura é a mão imersa na água fria. No passo **C**, apesar de a água dos recipientes estar a uma mesma temperatura (25 °C), a mão oriunda da água fria passa uma sensação de ser colocada em uma água morna; e a outra mão, uma sensação de água fria.

Estão corretas:

a) apenas II, III e IV.
b) apenas I, II e III.
c) apenas II e IV.
d) apenas I e IV.
e) todas as alternativas.

T. 73 (Vunesp) A respeito da informação "O calor específico de uma substância pode ser considerado constante e vale 3 J/g · °C", três estudantes, I, II e III, forneceram as explicações seguintes:

I. Se não ocorrer mudança de estado, a transferência de 3 J de energia térmica para 1 g dessa substância provoca elevação de 1 °C na sua temperatura.

II. Qualquer massa em gramas de um corpo construído com essa substância necessita de 3 J de energia térmica para que sua temperatura se eleve de 1 °C.

III. Se não ocorrer mudança de estado, a transferência de 1 J de energia térmica para 3 g dessa substância provoca elevação de 1 °C na sua temperatura.

Dentre as explicações apresentadas:

a) apenas I está correta.
b) apenas II está correta.
c) apenas III está correta.
d) apenas I e II estão corretas.
e) apenas II e III estão corretas.

T. 74 (Ufes) Dois objetos, *A* e *B*, são constituídos do mesmo material e recebem a mesma quantidade de calor. Observa-se que a variação da temperatura do objeto *A* é o dobro da variação da temperatura do objeto *B*. Podemos, então, afirmar que:

a) a capacidade térmica de *B* é o dobro da de *A*.
b) o calor específico de *B* é o dobro do de *A*.
c) a capacidade térmica de *A* é o dobro da de *B*.
d) o calor específico de *A* é o dobro do de *B*.
e) os dois objetos têm coeficiente de dilatação térmica diferente.

T. 75 (UCSal-BA) A massa, a temperatura e o calor específico de cinco amostras de materiais sólidos estão apresentados na tabela.

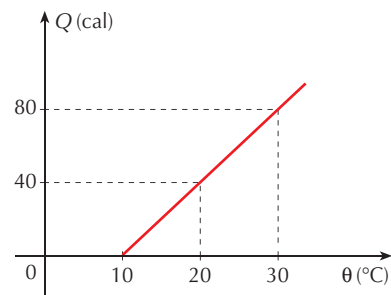
Amostra	Massa (g)	Temperatura (°C)	Calor específico (cal/g · °C)
1	10	80	0,20
2	20	70	0,10
3	15	80	0,10
4	30	60	0,05
5	20	50	0,20

Essas amostras são, simultaneamente, imersas em um recipiente com água, atingindo rapidamente o equilíbrio térmico a 30 °C. Dentre essas, a que cedeu maior quantidade de calor para a água foi a amostra de número:

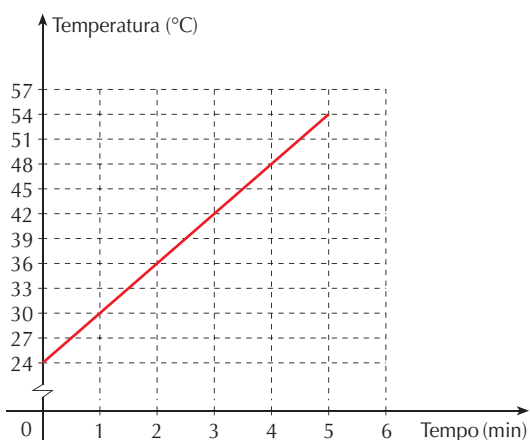
a) 4 **b)** 5 **c)** 3 **d)** 2 **e)** 1

T. 76 (Mackenzie-SP) No laboratório de Física, um estudante observa que, fornecendo a mesma quantidade de calor a um corpo de 400 g de certa liga metálica e a uma massa de água líquida de 100 g, tanto o corpo metálico como a água sofrem igual variação de temperatura. Durante a experiência, não ocorre mudança do estado de agregação molecular das duas substâncias. Sendo 1 cal/g · °C o calor específico da água, o calor específico da liga metálica é:

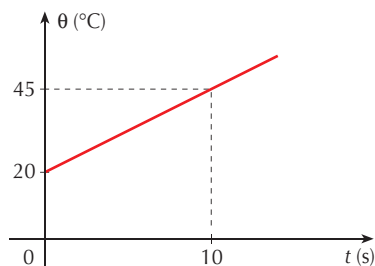
a) 0,20 cal/g · °C
b) 0,25 cal/g · °C
c) 0,30 cal/g · °C
d) 0,35 cal/g · °C
e) 0,40 cal/g · °C

T. 77 (UFRRJ) Um estudante de Física Experimental fornece calor a um certo corpo, inicialmente à temperatura de 10 °C. Ele constrói o gráfico indicado na figura, onde, no eixo vertical, registra as quantidades de calor cedidas ao corpo, enquanto, no eixo horizontal, vai registrando a temperatura do corpo.

Consideremos agora um outro corpo, com o dobro da massa do primeiro, feito da mesma substância e também inicialmente a 10 °C. Com base no gráfico, podemos dizer que, fornecendo uma quantidade de calor igual a 120 calorias a esse outro corpo, sua temperatura final será de:

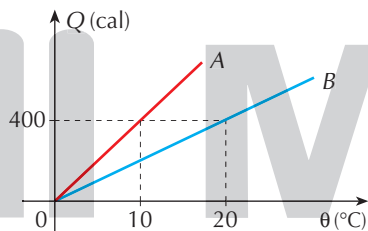
a) 18 °C **b)** 20 °C **c)** 40 °C **d)** 30 °C **e)** 25 °C

T. 78 (Vunesp) O gráfico representa a temperatura em função do tempo de um líquido aquecido em um calorímetro.

Considerando-se desprezível a capacidade térmica do calorímetro e que o aquecimento foi obtido através de uma resistência elétrica, dissipando energia à taxa constante de 120 W, a capacidade térmica do líquido vale:

a) 12 J/°C
b) 20 J/°C
c) 120 J/°C
d) 600 J/°C
e) 1.200 J/°C

T. 79 (Uniube-MG) Uma fonte térmica fornece 55 cal/s com potência constante. Um corpo de massa 100 g absorve totalmente a energia proveniente da fonte e tem temperatura variando em função do tempo, conforme o gráfico.

A capacidade térmica desse corpo e o calor específico da substância de que é constituído são, respectivamente, iguais a:

a) 2,2 cal/ °C e 0,022 cal/g · °C
b) 2,2 cal/ °C e 0,22 cal/g · °C
c) 2,2 cal/ °C e 2,2 cal/g · °C
d) 22 cal/ °C e 0,22 cal/g · °C
e) 22 cal/ °C e 0,022 cal/g · °C

T. 80 (UFSC) O gráfico representa a quantidade de calor absorvida por dois objetos, *A* e *B*, ao serem aquecidos, em função de suas temperaturas.

Observe o gráfico e assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

01) A capacidade térmica do objeto *A* é maior que a do objeto *B*.
02) A partir do gráfico é possível determinar as capacidades térmicas dos objetos *A* e *B*.
04) Pode-se afirmar que o calor específico do objeto *A* é maior que o do objeto *B*.
08) A variação de temperatura do objeto *B*, por caloria absorvida, é maior que a variação de temperatura do objeto *A*, por caloria absorvida.
16) Se a massa do objeto *A* for de 200 g, seu calor específico será 0,2 cal/g · °C.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 81 (UFG-GO) O cérebro de um homem típico, saudável e em repouso, consome uma potência de aproximadamente 16 W. Supondo que a energia gasta pelo cérebro em 1 min fosse completamente usada para aquecer 10 mℓ de água, a variação de temperatura seria de, aproximadamente:

Densidade da água: $1,0 \cdot 10^3$ kg/m^3
Calor específico da água: $4,2 \cdot 10^3$ J/kg · °C

a) 0,5 °C
b) 2 °C
c) 11 °C
d) 23 °C
e) 48 °C

T. 82 (UFF-RJ)

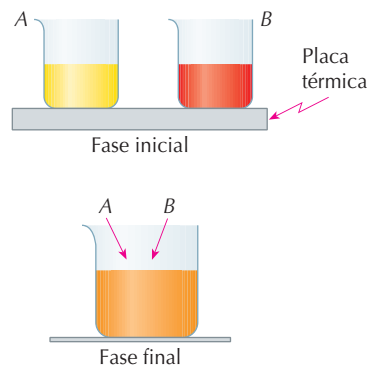
Duelo de Gigantes

O Rio Amazonas é o maior rio do mundo em volume de água, com uma vazão em sua foz de, aproximadamente, 175 milhões de litros por segundo. A usina hidroelétrica de Itaipu (foto) também é a maior do mundo, em operação. A potência instalada da usina é de $12,6 \times 10^9$ W.

Suponha que toda essa potência fosse utilizada para aquecer a água que flui pela foz do Rio Amazonas, sem que houvesse perdas de energia. Nesse caso, a variação de temperatura dessa água, em graus Celsius, seria da ordem de:

a) 10^{-2}
b) 10^{-1}
c) 10^0
d) 10^1
e) 10^2

Calor específico da água: 1,0 cal/g · °C
Densidade da água: 1,0 g/cm^3
1 cal = 4,2 J

T. 83 (Fuvest-SP) Dois recipientes iguais *A* e *B*, contendo dois líquidos diferentes, inicialmente a 20 °C, são colocados sobre uma placa térmica, da qual recebem aproximadamente a mesma quantidade de calor. Com isso, o líquido em *A* atinge 40 °C, enquanto o líquido em *B*, 80 °C.

Se os recipientes forem retirados da placa e seus líquidos misturados, a temperatura final da mistura ficará em torno de:

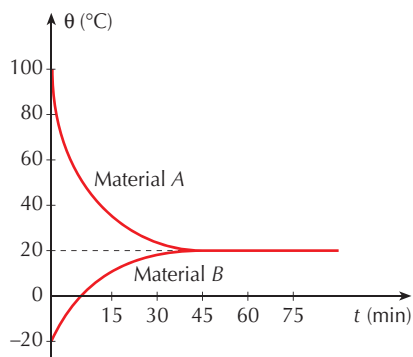
a) 45 °C
b) 50 °C
c) 55 °C
d) 60 °C
e) 65 °C

T. 84 (ITA-SP) Numa cozinha industrial, a água de um caldeirão é aquecida de 10 °C a 20 °C, sendo misturada, em seguida, à água a 80 °C de um segundo caldeirão, resultando 10 ℓ de água a 32 °C, após a mistura. Considere que haja troca de calor apenas entre as duas porções de água misturadas e que a densidade absoluta da água, de 1 kg/ℓ, não varia com a temperatura, sendo, ainda, seu calor específico $c = 1{,}0\ \text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$. A quantidade de calor recebida pela água do primeiro caldeirão ao ser aquecida até 20 °C é de:

a) 20 kcal
b) 50 kcal
c) 60 kcal
d) 80 kcal
e) 120 kcal

T. 85 (Mackenzie-SP) Em um experimento, dispõe-se de um bloco metálico de capacidade térmica 80 cal/°C, à temperatura de 100 °C. Esse bloco é colocado no interior de um calorímetro de capacidade térmica 8 cal/°C, que contém 200 g de água $\left(c = 1\frac{\text{cal}}{g \cdot {}^\circ\text{C}}\right)$ a 20 °C. Sabendo que o equilíbrio térmico ocorre a 40 °C, podemos afirmar que a quantidade de energia térmica dissipada pelo calorímetro foi de:

a) 280 cal
b) 340 cal
c) 480 cal
d) 520 cal
e) 640 cal

T. 86 (UFC-CE) Uma quantidade *m* do material A, de calor específico desconhecido, foi posta em contato térmico com igual quantidade *m* do material B, cujo calor específico é $c_B = 0{,}22$ cal/g · °C. Os materiais em contato foram isolados termicamente da vizinhança, e a temperatura de cada um foi medida ao longo do tempo até o equilíbrio térmico entre eles ser atingido. A figura mostra os gráficos de temperatura *versus* tempo, resultantes dessas medidas.

O calor específico c_A do material A vale:

a) 0,44 cal/g · °C
b) 0,33 cal/g · °C
c) 0,22 cal/g · °C
d) 0,11 cal/g · °C
e) 0,06 cal/g · °C

T. 87 (Mackenzie-SP) Um calorímetro de capacidade térmica 5,0 cal/°C contém 200 g de água (calor específico = 1,0 cal/g · °C) a 20 °C. Ao colocarmos um bloco metálico de 500 g à temperatura de 100 °C no interior desse calorímetro, observamos que o sistema atinge o equilíbrio térmico a 60 °C. O calor específico do metal que constitui esse bloco, em cal/g · °C, é:

a) 0,30
b) 0,36
c) 0,41
d) 0,46
e) 0,52

T. 88 (E. Naval-RJ) Um bloco metálico A encontra-se, inicialmente, à temperatura θ °C. Sendo colocado em contato com outro bloco B de material diferente, mas de mesma massa, inicialmente a 0 °C, verifica-se, no equilíbrio térmico, que a temperatura dos dois blocos é de 0,75 θ °C. Supondo que só houve troca de calor entre os dois corpos, a relação entre os calores específicos dos materiais A e B $\left(\frac{c_A}{c_B}\right)$ é:

a) $\frac{1}{4}$
b) 4
c) 0,4
d) 40
e) 3

T. 89 (Fuvest-SP) Dois recipientes iguais, A e B, contêm, respectivamente, 2,0 litros e 1,0 litro de água à temperatura de 20 °C. Utilizando um aquecedor elétrico, de potência constante, e mantendo-o ligado durante 80 s, aquece-se a água do recipiente A até a temperatura de 60 °C. A seguir, transfere-se 1,0 litro de água de A para B, que passa a conter 2,0 litros de água à temperatura θ. Essa mesma situação final, para o recipiente B, poderia ser alcançada colocando-se 2,0 litros de água a 20 °C em B e, a seguir, ligando-se o mesmo aquecedor elétrico em B, mantendo-o ligado durante um tempo aproximado de:

a) 40 s
b) 60 s
c) 80 s
d) 100 s
e) 120 s

A experiência de Joule

Para chegar ao equivalente mecânico do calor, James Prescott Joule realizou uma série de experiências. A mais conhecida delas, apresentada em 1845 numa monografia à Royal Society, consistia de uma série de pás girantes fixadas em torno de um eixo vertical, colocadas em uma cuba termicamente isolada do exterior, imersas em água.

O dispositivo utilizado por Joule está ilustrado, esquematicamente, na figura ao lado. O movimento de rotação das pás é obtido com o auxílio de um molinete, o qual é acionado pela queda de dois blocos. A velocidade de rotação do eixo vertical permanece praticamente constante, devido à grande resistência da água ao movimento das pás. Sendo assim, a energia cinética dos blocos também praticamente não varia durante a queda, mas a energia potencial deles é totalmente transformada em energia térmica; em consequência, a água se aquece. Utilizando-se um termômetro de precisão, mede-se a variação de temperatura sofrida pelo líquido.

Desse modo, sendo conhecido o peso P de cada bloco e a altura de queda H, é possível determinar a energia potencial E dos blocos à altura H:

$$E = 2P \cdot H$$

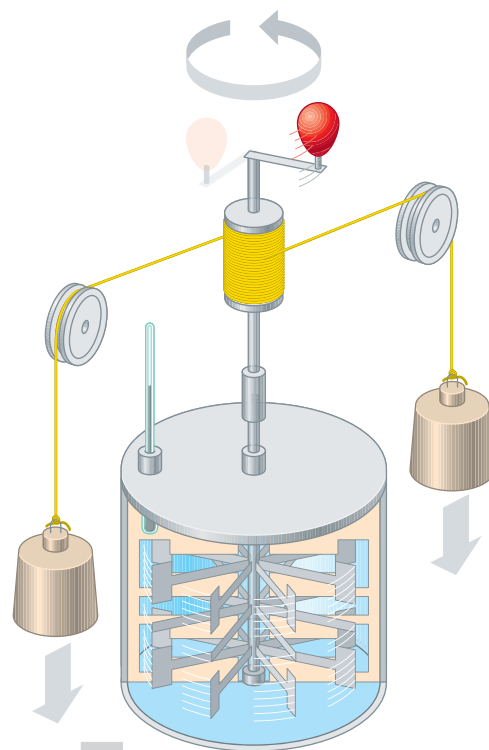
Sendo m a massa de água, c seu calor específico e $\Delta\theta$ a variação de temperatura, a quantidade de calor Q absorvida pela água no processo será dada por:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$

Comparando as duas quantidades, é possível estabelecer a relação entre a unidade da energia mecânica (joule) e a unidade da quantidade de calor (caloria):

$$1 \text{ cal} = 4{,}1868 \text{ J}$$

Originalmente, os pesos utilizados por Joule tinham 4 libras cada um, caíam de uma altura de 12 jardas e a velocidade de queda era de 1 pé por segundo. A operação foi repetida dezesseis vezes e a temperatura da água foi determinada com o auxílio de um termômetro sensível, capaz de detectar diferenças de temperatura de 1 centésimo de grau Fahrenheit. Todas essas unidades são do sistema inglês.

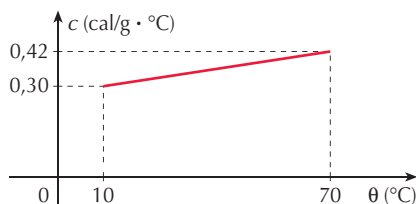
O valor do **equivalente mecânico do calor** (como então foi chamado) encontrado por Joule foi, em unidades de hoje, 4,15 joules* para 1 caloria — um valor bem aceitável para as condições em que os experimentos foram realizados. O valor exato dessa equivalência foi obtido posteriormente, fruto de experiências mais cuidadosamente conduzidas.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/joule/joule.htm (acesso em julho/2009), você poderá reproduzir, por meio de uma simulação, a experiência de Joule, com a transformação de energia mecânica em calor.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Animação: *A experiência de Joule*

* O nome joule (J), que designa a unidade de energia no SI, foi atribuído em homenagem ao cientista, em 1889.

EXERCÍCIOS ESPECIAIS de Calorimetria

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

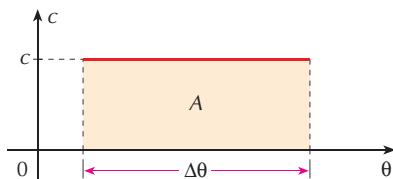
R.26 O calor específico de uma substância no estado líquido varia com a temperatura, sob pressão constante, segundo o gráfico. Determine a quantidade de calor necessária para aquecer 50 g dessa substância entre 10 °C e 70 °C.

Solução:
Como o calor específico é variável, não se pode usar diretamente a equação fundamental da Calorimetria $Q = mc\Delta\theta$. No caso, como a variação do calor específico é linear com a temperatura, pode-se adotar no intervalo considerado o calor específico médio como a média aritmética dos calores específicos extremos. Então:

$$c_M = \frac{0{,}30 + 0{,}42}{2} \Rightarrow c_M = 0{,}36 \text{ cal/g} \cdot \text{°C}$$

Aplica-se agora a equação fundamental da Calorimetria usando-se esse valor médio para o calor específico ($Q = m \cdot c_M \cdot \Delta\theta$).
Sendo $m = 50$ g e $\Delta\theta = 70\ \text{°C} - 10\ \text{°C} = 60\ \text{°C}$, temos:

$$Q = 50 \cdot 0{,}36 \cdot 60 \Rightarrow \boxed{Q = 1.080 \text{ cal}}$$

Resposta: 1.080 calorias

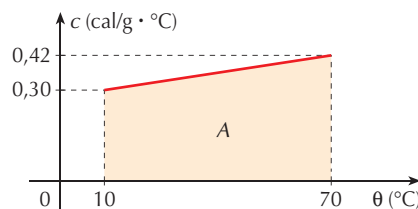
Observação:
Outra solução (mais geral, pois pode ser usada mesmo que a variação do calor específico não seja linear) seria a utilização de uma propriedade do gráfico $c \times \theta$.
Se o calor específico fosse constante, teríamos o gráfico abaixo.

A área destacada, no intervalo de temperatura $\Delta\theta$, seria dada numericamente por:

$$A = c \cdot \Delta\theta$$

Mas, da equação fundamental, obtemos:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow \frac{Q}{m} = c \cdot \Delta\theta$$

Comparando: $\boxed{A = \frac{Q}{m}}$ (numericamente)

Essa propriedade pode ser generalizada para qualquer gráfico que forneça a variação do calor específico com a temperatura. Para o caso do problema apresentado:

$$A = \frac{Q}{m} = \frac{0{,}42 + 0{,}30}{2} \cdot (70 - 10) \Rightarrow \frac{Q}{m} = 0{,}36 \cdot 60 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{Q}{50} = 21{,}6 \Rightarrow \boxed{Q = 1.080 \text{ cal}}$$

R.27 De que altura deve cair, partindo do repouso, um corpo de massa 2 kg, para que sua temperatura se eleve de 5 °C ao se chocar inelasticamente com o chão? Admita que somente o corpo absorva a energia térmica desprendida. O calor específico do material do corpo é 0,04 cal/g · °C.
Adote $g = 10$ m/s^2 e 1 cal = 4 J.

Solução:
A energia potencial gravitacional do corpo (E_p) em relação ao solo vai se converter totalmente em calor (Q) que aquece o corpo:

$$E_p = Q$$

Sendo $E_p = mgh$ e $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$, vem:

$$\cancel{m}gh = \cancel{m} \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{h = \frac{c \cdot \Delta\theta}{g}}$$

No entanto, para que essa fórmula possa ser usada, o calor específico deve ser expresso em J/kg · °C. Assim:

$$c = 0{,}004 \frac{\text{cal}}{g \cdot C} = 0{,}04 \cdot \frac{4 \text{ J}}{10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{°C}} = 160 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$$

Portanto: $h = \frac{160 \cdot 5}{10} \Rightarrow \boxed{h = 80 \text{ m}}$

Resposta: 80 m

R. 28 Uma bala de chumbo de 5 g de massa move-se a uma velocidade de 40 m/s no instante em que se choca com uma parede, ficando nela inscrustada. Supondo que toda a energia mecânica da bala tenha se convertido em calor que a aqueceu, determine sua elevação de temperatura (dados: calor específico do chumbo = 0,03 cal/g · °C; $g = 10$ m/s^2; 1 cal = 4,18 J).

Solução:
A energia cinética da bala se converte, com o impacto, no calor que vai aquecê-la:

$$E_c = Q$$

Sendo $E_c = \frac{mv^2}{2}$ e $Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta$, vem:

$$\frac{\cancel{m}v^2}{2} = \cancel{m} \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow \boxed{\Delta\theta = \frac{v^2}{2c}}$$

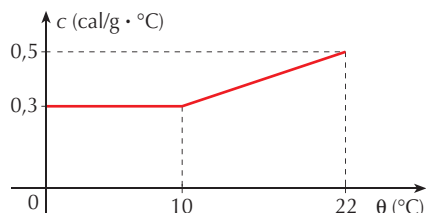
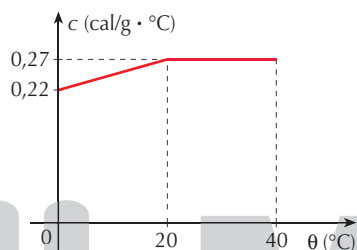
Para usar essa fórmula, o calor específico deve estar em J/kg · °C. Então:

$$c = 0{,}03 \cdot \frac{\text{cal}}{g \cdot \text{°C}} = 0{,}03 \cdot \frac{4{,}18 \text{ J}}{10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{°C}} = 125{,}4 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$$

Assim: $\Delta\theta = \frac{(40)^2}{2 \cdot 125{,}4} \Rightarrow \boxed{\Delta\theta \simeq 6{,}38 \text{ °C}}$

Resposta: $\simeq$ 6,38 °C

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 75 Suponha que o calor específico de uma substância varie com a temperatura segundo o gráfico. Determine a quantidade de calor necessária para aquecer 60 g dessa substância no intervalo de temperaturas considerado.

P. 76 Vamos supor que o calor específico de uma substância varie num certo intervalo de temperatura obedecendo ao gráfico abaixo.

a) Determine a quantidade de calor necessária para aquecer 150 g da substância de 0 a 40 °C.

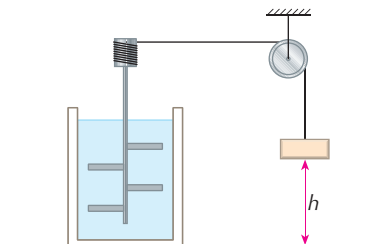
b) Qual é o calor específico médio da substância no intervalo de temperaturas considerado?

P. 77 (Unifei-MG) As experiências básicas para a obtenção do equivalente mecânico da caloria foram realizadas durante um período de quase 30 anos pelo cervejeiro e cientista amador inglês James Prescott Joule. Mesmo em lua de mel, Joule foi encontrado, munido de um imenso termômetro, subindo ao topo de uma cachoeira. Queria verificar a diferença de temperatura que a água deveria apresentar, conforme seus cálculos, entre o início e o fim da queda (para as Cataratas do Niágara, ele estimou essa diferença em aproximadamente 0,2 °C).
(Dados: 1 cal = 4,18 J; c = 1 cal/g · °C; g = 10 m/s^2)

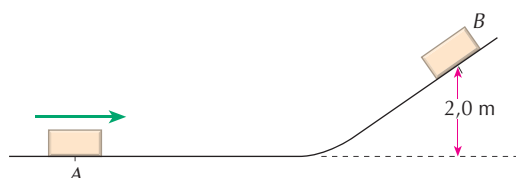
a) De que altura devem cair 10 g de água para que a sua temperatura aumente 1 °C? (admita que toda a energia potencial da água é transformada em energia interna quando a água se choca com o chão).

b) E 100 g de água?

P. 78 (Olimpíada Brasileira de Física) Uma bola de massa m, cuja velocidade inicial é v_i = 20 m/s, sofre a ação de uma força aceleradora constante de 15 N, durante um percurso retilíneo de 10 m. Ao final do percurso a bola se choca inelasticamente com uma parede, produzindo, entre outros efeitos, deformação e calor. Suponha que apenas 50% da energia cinética da bola seja convertida em calor e que 75% deste calor seja absorvido pela bola. Se o calor específico da bola vale 0,2 J/g · °C e o aumento de temperatura da bola foi de 6 °C, qual é a massa da bola?

P. 79 (AFA-SP) A figura apresenta o esquema simplificado da experiência de Joule. O bloco tem massa 10 kg e está a uma altura h = 4,20 m. Quando ele cai, produz o movimento das pás, mergulhadas em 1 kg de água.

Supondo que toda a variação de energia potencial gravitacional do sistema foi transformada em calor, considerando $c_{água}$ = 1 cal/g · °C, 1 cal = 4,2 J e g = 10 m/s^2, determine a variação de temperatura da água.

P. 80 (UFRJ) Um recipiente de capacidade térmica desprezível contém 1 kg de um líquido extremamente viscoso. Dispara-se um projétil de $2 \cdot 10^{-2}$ kg que, ao penetrar no líquido, vai rapidamente ao repouso. Verifica-se então que a temperatura do líquido sofre um acréscimo de 3 °C. Sabendo que o calor específico do líquido é 3 J/kg · °C, calcule a velocidade com que o projétil penetra no líquido.

P. 81 (Uerj) Um corpo de massa 2,0 kg é lançado do ponto A, conforme indicado na figura, sobre um plano horizontal, com uma velocidade de 20 m/s. Em seguida, sobe uma rampa até atingir uma altura máxima de 2,0 m, no ponto B (dado: g = 10 m/s^2).

Sabe-se que o calor gerado no processo foi todo absorvido pelo corpo e que um termômetro sensível ligado ao corpo acusa uma variação de temperatura de 1 °C.

a) Determine o calor específico médio do material que constitui o corpo, em J/kg · °C.

b) Indique se a altura máxima atingida pelo corpo, caso não houvesse dissipação de energia, seria maior, menor ou igual a 2,0 m. Justifique sua resposta.

P. 82 (Mackenzie-SP) Um martelo com 2 kg de massa é usado para golpear um bloco de chumbo de massa 5 kg, cuja temperatura se eleva de 20 °C a 30 °C após ter recebido 50 golpes. Admita que 80% da energia mecânica seja retida pelo chumbo. Determine:

a) a altura de queda equivalente do martelo em cada golpe;

b) a velocidade do martelo no momento do golpe.

(Dados: calor específico do chumbo = = 0,031 cal/g · °C; g = 10 m/s^2; 1 cal = 4,18 J)

UNIDADE C

Capítulo 5

Mudanças de fase

A mudança na temperatura de uma substância pode ser acompanhada por uma série de modificações perceptíveis ou não a olho nu.

Dentre tais modificações, podemos destacar as mudanças de estado físico, que acontecem em pressões e temperaturas características para cada uma das substâncias.

5.1 Considerações gerais

Em determinadas condições de pressão e temperatura, uma substância pode passar de uma fase para outra.

5.2 Quantidade de calor latente

A quantidade de calor latente necessária para que ocorra uma mudança de fase depende da massa e da natureza da substância.

Denomina-se fase de uma substância o seu estado de agregação, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. As mudanças de fase em substâncias puras têm lugar a pressões e temperaturas definidas. A quantidade de calor necessária para produzir uma mudança de fase chama-se calor latente. Em uma erupção vulcânica podemos observar que rochas no estado líquido, a lava, após o seu resfriamento, tornam-se sólidas e passam a formar o solo do local atingido pela erupção.

Seção 5.1

Considerações gerais

Objetivos

- Caracterizar os estados de agregação de uma substância.
- Analisar as mudanças de fase de uma substância considerando suas características microscópicas.

Termos e conceitos

- **distância intermolecular**
- **força de coesão**
- **retículo cristalino**

Como vimos no Capítulo 1, uma substância pura pode se apresentar em três fases ou estados de agregação: sólido, líquido e gasoso. A água, por exemplo, pode estar, conforme as condições, na fase sólida (gelo), na fase líquida (água líquida) ou na fase gasosa (vapor-d'água).

Na fase gasosa, a substância não apresenta nem forma nem volume definidos. As forças de coesão entre as moléculas são pouco intensas, permitindo-lhes grande liberdade de movimentação.

Na fase líquida, as distâncias médias entre as moléculas são bem menores que nos gases à mesma pressão. No entanto, o fato de a forma do líquido ser facilmente variável indica que suas moléculas ainda possuem certa liberdade de movimentação. A menor distância intermolecular, porém, faz com que as forças de coesão entre as moléculas sejam mais intensas no líquido. Do mesmo modo que nos gases, podemos estabelecer que as moléculas do líquido possuem energia cinética média dependente da temperatura.

Na fase sólida, as moléculas estão dispostas com regularidade, num arranjo especial denominado **retículo cristalino**. As forças de coesão são intensas, permitindo às moléculas apenas ligeiras vibrações em torno de suas posições na estrutura do material. Os sólidos possuem forma e volume bem definidos.

A distribuição das moléculas em um cristal de neve determina sua bela forma.

Na **figura 1**, representamos as três fases de uma substância e suas características macroscópicas.

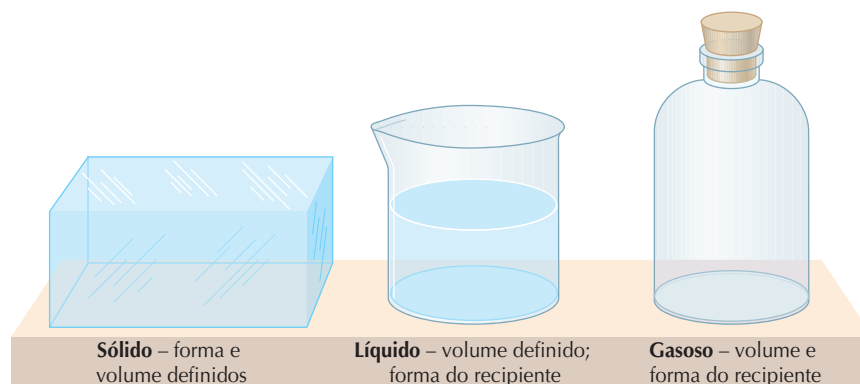



Figura 1. As fases ou estados de agregação de uma substância.

Em determinadas condições de pressão e temperatura, uma substância pode passar de uma fase para outra, ocorrendo então uma **mudança de fase** ou **mudança de estado de agregação**. As mudanças de fase possíveis a uma substância e seus respectivos nomes estão representados na **figura 2**.

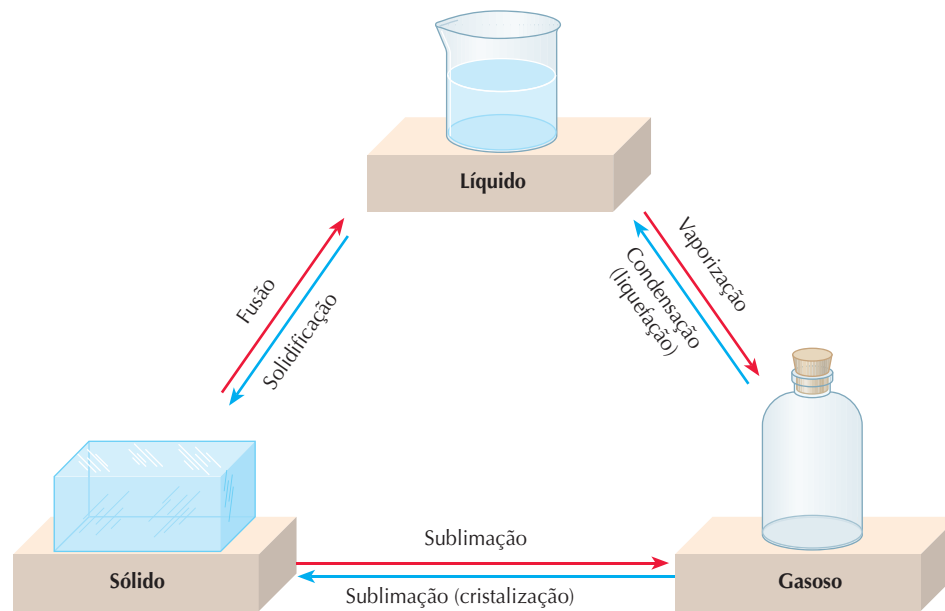



Figura 2. **As mudanças de fase de uma substância.**

Quando um sólido cristalino recebe calor, suas moléculas passam a se agitar mais intensamente. À temperatura de fusão, a agitação térmica é suficientemente forte para destruir a estrutura cristalina. As moléculas adquirem energia suficiente para se livrarem das adjacentes, passando a ter a liberdade de movimento característica dos líquidos.

Durante a fusão, a temperatura não varia, pois o calor trocado ao longo do processo corresponde à energia necessária para desfazer o retículo cristalino do sólido.

Terminada a fusão, aquecendo-se o líquido formado, a temperatura volta a aumentar, isto é, aumenta a agitação de suas moléculas. Uma vez alcançada a temperatura de ebulição, o calor recebido pelo líquido corresponde à energia necessária para vencer as forças de coesão entre as moléculas: o líquido ferve, e a temperatura não varia durante esse processo.

(A) Ferro líquido: a fusão do ferro ocorre a 1.535 °C, sob pressão normal. (B) Nitrogênio líquido: a condensação do nitrogênio ocorre a −195,8 °C, sob pressão normal. (C) O vapor de água que sai do bico da chaleira é invisível. Ao se afastar, o vapor se resfria e se condensa, formando a "fumaça", constituída de gotículas de água líquida.

Seção 5.2

Quantidade de calor latente

Objetivos

- Analisar o que ocorre com a temperatura durante as mudanças de fase.
- Conceituar calor latente.
- Construir e analisar curvas de aquecimento e de resfriamento de diferentes materiais.

Termos e conceitos

- curva de aquecimento
- curva de resfriamento
- calor latente

Imaginemos um recipiente contendo gelo inicialmente a 0 °C (**fig. 3A**). Se colocarmos esse sistema em presença de uma fonte de calor (**fig. 3B**), notaremos que, com o passar do tempo, o gelo se transforma em água líquida (fusão do gelo), mas a temperatura durante a fusão permanece constante (0 °C). Assim, o sistema está recebendo calor da fonte, mas a temperatura não varia.

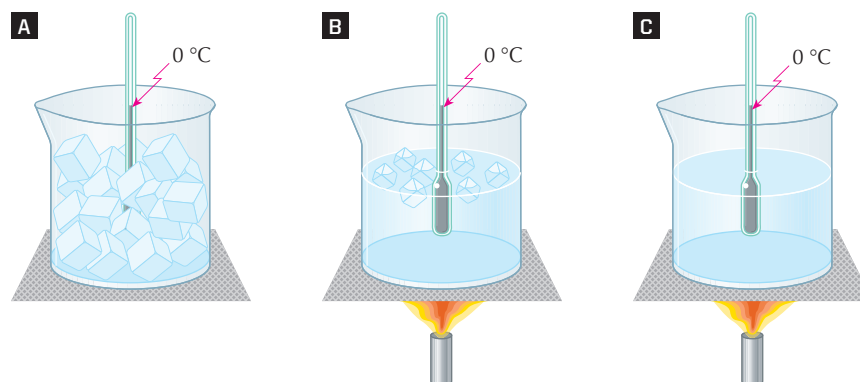



Figura 3. **Enquanto o gelo derrete, a temperatura se mantém em 0 °C, sob pressão normal.**

Quando o gelo derrete, verifica-se que ele deve receber, por grama, 80 calorias, mantendo-se a temperatura constante em 0 °C. Essa quantidade (80 cal/g) é denominada calor latente de fusão do gelo: $L_F = 80$ cal/g. Assim:

Calor latente* L de uma mudança de fase é a quantidade de calor que a substância recebe (ou cede), por unidade de massa, durante a transformação, mantendo-se constante a temperatura.

Já vimos que, para um corpo que recebe calor, a quantidade de calor trocado é positiva ($Q > 0$); e, para aquele que cede calor, a quantidade trocada é negativa ($Q < 0$). Do mesmo modo, o calor latente poderá ser positivo ou negativo, conforme a mudança de fase ocorra com ganho ou perda de calor. Por exemplo:

Fusão do gelo (a 0 °C)	$L_F = 80$ cal/g
Solidificação da água (a 0 °C)	$L_S = -80$ cal/g
Vaporização da água (a 100 °C)	$L_V = 540$ cal/g
Condensação do vapor (a 100 °C)	$L_C = -540$ cal/g

De modo geral, para a massa m de um material sofrendo mudança de fase, de calor latente L, a quantidade total de calor Q trocada no processo pode ser calculada pela fórmula:

$$Q = m \cdot L$$

* Na verdade, o que se define é um **calor latente específico**, uma vez que se refere à massa de 1 g. Entretanto, já está consagrado pelo uso falar-se apenas em **calor latente**, omitindo-se o termo "específico".

Curvas de aquecimento e de resfriamento

Vamos supor que tenhamos, num recipiente, certa massa de gelo inicialmente a −20 °C, sob pressão normal. Se levarmos esse sistema ao fogo (**fig. 4**), acompanhando como varia a temperatura no decorrer do tempo, veremos que o processo todo pode ser dividido em cinco etapas distintas:

A) aquecimento do gelo de −20 °C a 0 °C;

B) fusão do gelo a 0 °C;

C) aquecimento da água líquida de 0 °C a 100 °C;

D) vaporização (fervura) da água líquida a 100 °C;

E) aquecimento do vapor acima de 100 °C (possível somente se o confinarmos em um recipiente adequado).

Essas várias etapas podem ser "visualizadas" num gráfico cartesiano, em que se colocam os valores da temperatura no eixo das ordenadas e a quantidade de calor trocado no eixo das abscissas (**fig. 5**). O conjunto das retas obtidas nesse gráfico recebe o nome de **curva de aquecimento** da água.

Se considerarmos o processo inverso, com perda de calor de um sistema constituído por vapor-d'água inicialmente a 110 °C, sob pressão normal, obteremos a **curva de resfriamento** da água (**fig. 6**), com as seguintes etapas:

A) resfriamento do vapor de 110 °C a 100 °C;

B) condensação (liquefação) do vapor a 100 °C;

C) resfriamento da água líquida de 100 °C a 0 °C;

D) solidificação da água a 0 °C;

E) resfriamento do gelo abaixo de 0 °C.

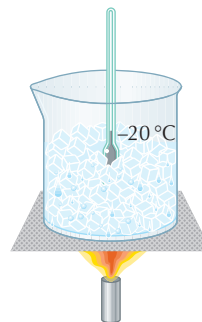



Figura 4. Aquecimento de gelo a partir de −20 °C.

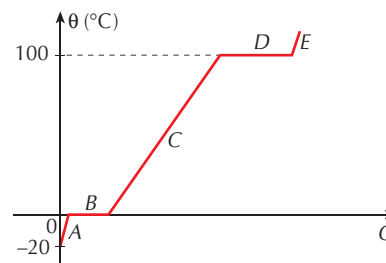



Figura 5. Curva de aquecimento da água sob pressão normal.

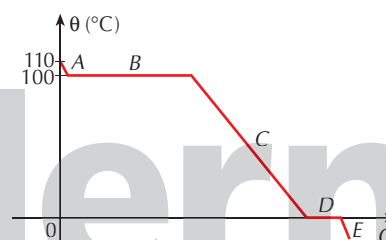
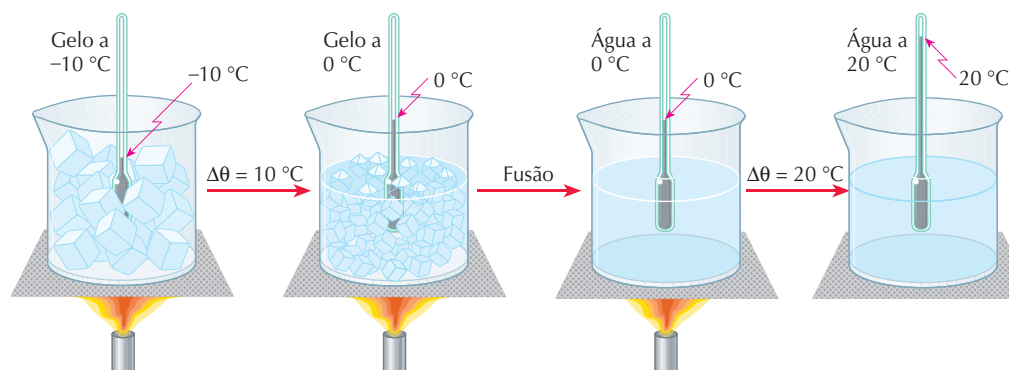



Figura 6. Curva de resfriamento da água sob pressão normal.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 29 Temos inicialmente 200 gramas de gelo a −10 °C. Determine a quantidade de calor que essa massa de gelo deve receber para se transformar em 200 g de água líquida a 20 °C. Trace a curva de aquecimento do processo (dados: calor específico do gelo = 0,5 cal/g · °C; calor específico da água = 1 cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g).

Solução:

Ao se transformar o gelo, a −10 °C, em água a 20 °C, ocorre a **fusão** do gelo na temperatura de 0 °C. Portanto, o processo deve ser subdividido em três etapas. Esquematicamente:

1ª etapa: aquecimento do gelo ($m = 200$ g; $\Delta\theta_1 = 0\ °C - (-10\ °C) = 10\ °C$; $c_1 = 0{,}5$ cal/g · °C)

$$Q_1 = m \cdot c_1 \cdot \Delta\theta_1 = 200 \cdot 0{,}5 \cdot 10 \Rightarrow Q_1 = 1.000 \text{ cal}$$

2ª etapa: fusão do gelo ($m = 200$ g; $L_F = 80$ cal/g)

$$Q_2 = m \cdot L_F = 200 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 16.000 \text{ cal}$$

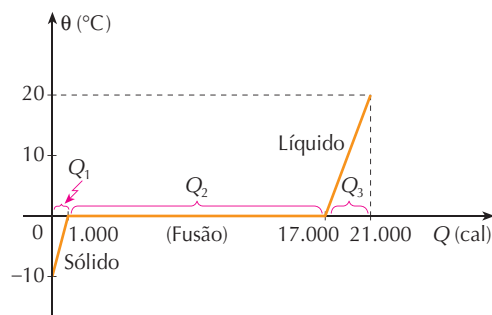
3ª etapa: aquecimento da água líquida ($m = 200$ g; $\Delta\theta_3 = 20\ °C - 0\ °C = 20\ °C$; $c_3 = 1$ cal/g · °C)

$$Q_3 = m \cdot c_3 \cdot \Delta\theta_3 = 200 \cdot 1 \cdot 20 \Rightarrow Q_3 = 4.000 \text{ cal}$$

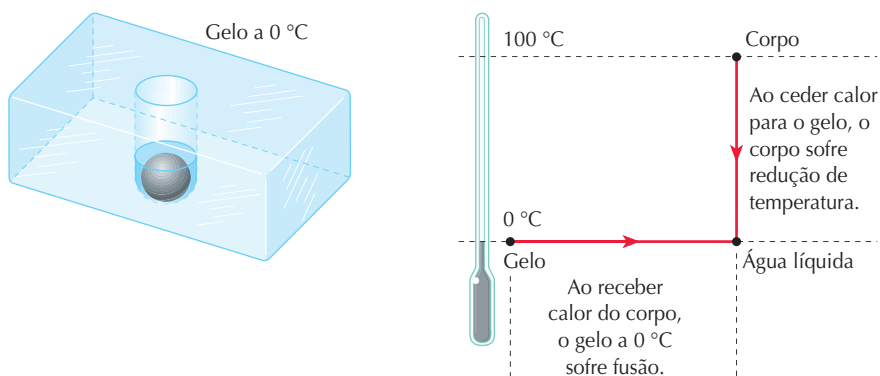
A quantidade total de calor Q será dada pela soma: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

$$Q = 1.000 + 16.000 + 4.000 \Rightarrow \boxed{Q = 21.000 \text{ cal}}$$

Com os dados deste exercício, podemos traçar a curva de aquecimento do sistema.
No eixo das ordenadas, lançamos as temperaturas indicadas pelo termômetro, e no eixo das abscissas, a quantidade de calor fornecida pela fonte. A primeira reta inclinada corresponde ao aquecimento do gelo, a reta coincidente com o eixo das abscissas indica a fusão do gelo e a segunda reta inclinada corresponde ao aquecimento da água resultante da fusão.
Tem-se:

$$Q_1 = 1.000 \text{ cal}$$
$$Q_2 = 17.000 \text{ cal} - 1.000 \text{ cal} = 16.000 \text{ cal}$$
$$Q_3 = 21.000 \text{ cal} - 17.000 \text{ cal} = 4.000 \text{ cal}$$

Resposta: O sistema deve receber 21.000 cal ou 21 kcal.

R. 30 Fez-se uma cavidade num grande bloco de gelo a 0 °C e no seu interior colocou-se um corpo sólido de massa 16 g a 100 °C. Estando o sistema isolado termicamente do meio exterior, verificou-se, após o equilíbrio térmico, que se formaram 2,5 g de água líquida. Determine o calor específico do material que constitui o corpo. É dado o calor latente de fusão de gelo: 80 cal/g.

Solução:
A temperatura final de equilíbrio térmico é 0 °C. Enquanto o corpo perde calor e sua temperatura cai de 100 °C para 0 °C, o gelo recebe calor e a massa de 2,5 g se derrete, sofrendo fusão sem variação de temperatura. Esquematicamente:

Dispondo os dados em uma tabela, temos:

		m	c	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
(1)	**Corpo**	16 g	$x = ?$	100 °C	0 °C	−100 °C
(2)	**Fusão do gelo**	2,5 g	$L_F = 80$ cal/g			

Cálculo das quantidades de calor:

$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 16 \cdot x\,(-100) \Rightarrow Q_1 = -1.600x$$

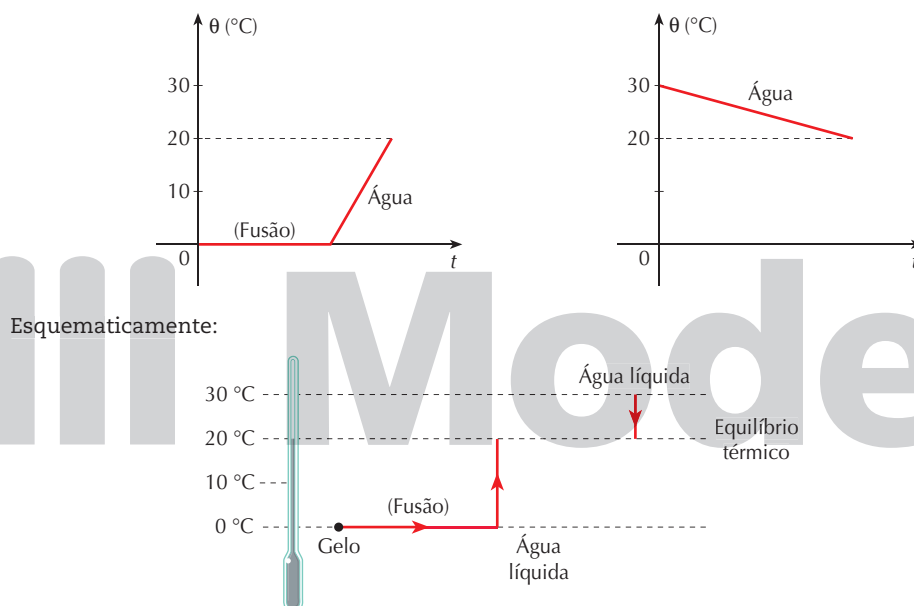
$$Q_2 = m \cdot L_F = 2{,}5 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 200 \text{ cal}$$

Como $Q_1 + Q_2 = 0$, temos:

$$-1.600x + 200 = 0 \Rightarrow 200 = 1.600x \Rightarrow \boxed{x = 0{,}125 \text{ cal/g} \cdot °\text{C}}$$

Resposta: 0,125 cal/g · °C

R. 31 Uma pedra de gelo a 0 °C é colocada em 200 g de água a 30 °C, num recipiente de capacidade térmica desprezível e isolado termicamente. O equilíbrio térmico se estabelece em 20 °C (dados: calor específico da água c = 1,0 cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo L = 80 cal/g). Qual é a massa da pedra de gelo?

Solução:
Ao receber calor da água, o gelo se derrete. Terminada a fusão, a água resultante continua recebendo calor, tendo sua temperatura se elevado de 0 °C para 20 °C. Enquanto isso, a água do recipiente perde calor e sua temperatura cai de 30 °C para 20 °C. Graficamente, essas ocorrências podem ser assim representadas:

Dispondo os dados em uma tabela, para facilitar os cálculos, temos:

	m	c (cal/g · °C)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
Fusão do gelo	x = ?	L_F = 80 cal/g			
Água da fusão	x = ?	1,0	0 °C	20 °C	20 °C
Água do recipiente	200 g	1,0	30 °C	20 °C	−10 °C

Cálculo das quantidades de calor trocadas

Fusão do gelo: $Q_1 = m \cdot L_F = x \cdot 80 \Rightarrow Q_1 = 80x$

Aquecimento da água resultante da fusão: $Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = x \cdot 1{,}0 \cdot 20 \Rightarrow Q_2 = 20x$

Resfriamento da água do recipiente: $Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 1{,}0 \cdot (-10) \Rightarrow Q_3 = -2.000$ cal

Mas $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$. Então:

$$80x + 20x - 2.000 = 0 \Rightarrow 100x = 2.000 \Rightarrow \boxed{x = 20 \text{ g}}$$

Resposta: 20 g

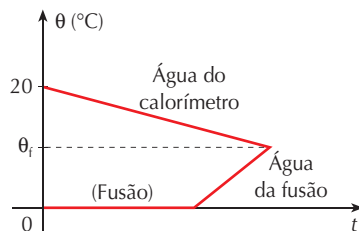
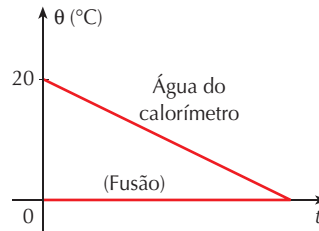
Entre na rede No endereço eletrônico http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/fusion/fusion.htm (acesso em julho/2009), você poderá simular um problema de trocas de calor com mudança de estado, numa mistura de água e gelo em fusão.

R. 32 Colocam-se 40 g de gelo a 0 °C em 100 g de água a 20 °C contidos num calorímetro de capacidade térmica desprezível (dados: calor específico da água $c = 1{,}0$ cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo $L = 80$ cal/g).
Ao ser atingido o equilíbrio térmico:

a) qual é a temperatura? **b)** qual é a massa de água existente no calorímetro?

Solução:

a) Quanto à temperatura final de equilíbrio térmico, há duas possibilidades, que podem ser graficamente representadas do seguinte modo:

(I) $\theta_f > 0$ °C

(II) $\theta_f = 0$ °C

Para decidir entre as duas possibilidades, devemos avaliar previamente as quantidades de calor trocadas. Na hipótese (I), considera-se que o calor liberado pela água do calorímetro é suficiente para derreter todo o gelo e ainda aquecer até θ_f a água resultante. Na hipótese (II), o calor que a água do calorímetro libera não é suficiente para derreter todo o gelo e a temperatura final é 0 °C.

A quantidade de calor necessária para derreter totalmente ($m = 40$ g) é:

$$Q_1 = m \cdot L_F = 40 \cdot 80 \Rightarrow Q_1 = 3.200 \text{ cal}$$

A máxima quantidade de calor que a água do calorímetro ($m = 100$ g) pode fornecer corresponde a uma variação de temperatura desde 20 °C até 0 °C, isto é: $\Delta\theta = 0\ °C - 20\ °C = -20\ °C$. Então:

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 100 \cdot 1{,}0 \cdot (-20) \Rightarrow Q_2 = -2.000 \text{ cal}$$

Comparando Q_1 e Q_2, verificamos que a quantidade de calor máxima que a água do calorímetro pode perder (2.000 cal) é insuficiente para derreter todo o gelo, pois para isso seriam necessárias 3.200 cal. Assim, **apenas parte do gelo derrete**; portanto:

$$\boxed{\theta_f = 0\ °C}$$

Se eventualmente tivéssemos $|Q_2| > Q_1$, ocorreria o previsto na hipótese (I), e a resolução do problema seguiria o modelo do exercício resolvido anterior.

b) Sabendo que $\theta_f = 0$ °C, devemos calcular agora a massa de gelo que derrete. Tabelando os dados:

	m	c (cal/g · °C)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
Fusão do gelo	$x = ?$	$L_F = 80$ cal/g			
Água do calorímetro	100 g	1,0	20 °C	0 °C	−20 °C

Cálculo das quantidades de calor:

$$Q_1 = m \cdot L_F = x \cdot 80 \Rightarrow Q_1 = 80x$$
$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 100 \cdot 1{,}0 \cdot (-20) \Rightarrow Q_2 = -2.000 \text{ cal}$$

Aplicando o princípio geral das trocas de calor:

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

$$80x - 2.000 = 0 \Rightarrow 80x = 2.000 \Rightarrow x = \frac{2.000}{80} \Rightarrow x = 25 \text{ g}$$

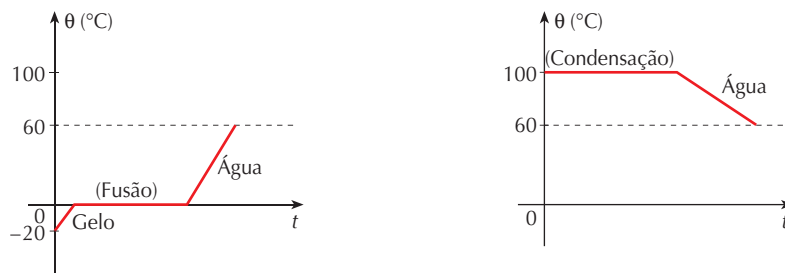
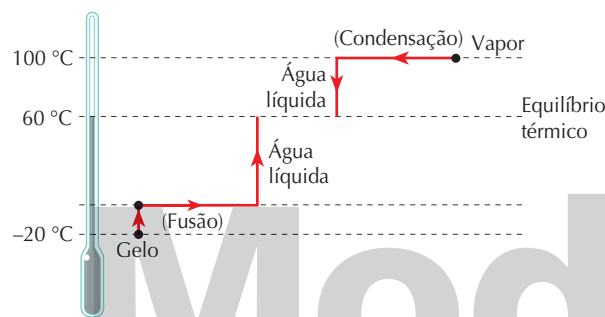
Portanto, apenas 25 g de gelo se convertem em água, fazendo com que, no equilíbrio térmico, exista no calorímetro a seguinte massa total de água:

$$m_T = 100 + 25 \Rightarrow \boxed{m_T = 125 \text{ g}}$$

Respostas: a) 0 °C; b) 125 g

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/latente/latente.htm (acesso em julho/2009), você poderá fazer a simulação com água em ebulição, traçando a curva de aquecimento, desde a água líquida até sua total vaporização.

R. 33 Um calorímetro de capacidade térmica desprezível tem no seu interior uma pedra de gelo a −20 °C com 200 g de massa. A esse calorímetro faz-se chegar vapor de água a 100 °C, até que a temperatura do sistema seja 60 °C. Sendo os calores latentes L_F = 80 cal/g (fusão) e L_C = −540 cal/g (condensação), calcule a massa de água existente nesse momento no calorímetro. São dados os calores específicos do gelo (0,5 cal/g · °C) e da água líquida (1 cal/g · °C).

Solução:
À medida que o gelo recebe calor, sua temperatura se eleva de −20 °C até 0 °C; chegando a 0 °C, ele se derrete, e após a fusão a água resultante se aquece de 0 °C até 60 °C. Enquanto isso, o vapor perde calor e se condensa; após o término da condensação, a água resultante se resfria de 100 °C a 60 °C. Os gráficos da temperatura em função do tempo são os seguintes:

Esquematicamente:

Tabelando os dados:

	m	c (cal/g · °C)	θ_i	θ_f	$\Delta\theta$
Gelo	200 g	0,5	−20 °C	0 °C	20 °C
Fusão do gelo	200 g	L_F = 80 cal/g			
Água da fusão	200 g	1	0 °C	60 °C	60 °C
Condensação do vapor	x = ?	L_C = −540 cal/g			
Água da condensação	x = ?	1	100 °C	60 °C	−40 °C

Cálculo das quantidades de calor trocadas

Aquecimento do gelo: $Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 0{,}5 \cdot 20 \Rightarrow Q_1 = 2.000$ cal

Fusão do gelo: $Q_2 = m \cdot L_F = 200 \cdot 80 \Rightarrow Q_2 = 16.000$ cal

Aquecimento da água resultante da fusão: $Q_3 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = 200 \cdot 1 \cdot 60 \Rightarrow Q_3 = 12.000$ cal

Condensação do vapor: $Q_4 = m \cdot L_C = x\,(-540) \Rightarrow Q_4 = -540x$

Resfriamento da água resultante da condensação: $Q_5 = m \cdot c \cdot \Delta\theta = x \cdot 1 \cdot (-40) \Rightarrow Q_5 = -40x$

Como $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 0$, temos:

$$2.000 + 16.000 + 12.000 - 540x - 40x = 0 \Rightarrow 30.000 = 580x \Rightarrow x = \frac{30.000}{580} \Rightarrow x \simeq 51{,}7 \text{ g}$$

Como é pedida a massa total de água, devemos somar as massas de água provenientes da fusão do gelo e da condensação do vapor:

$$m_T \simeq 200 + 51{,}7 \Rightarrow \boxed{m_T \simeq 251{,}7 \text{ g}}$$

Resposta: No equilíbrio térmico há 251,7 g de água, aproximadamente.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

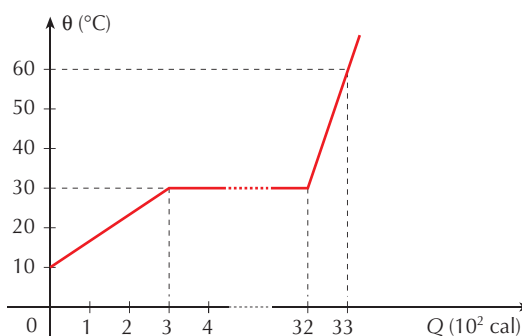
P. 83 Quantas calorias são necessárias para transformar 100 g de gelo, a −20 °C, em água a 60 °C? O gelo funde a 0 °C, tem calor específico 0,5 cal/g · °C e seu calor latente de fusão é 80 cal/g. O calor específico da água é 1 cal/g · °C. Construa a curva de aquecimento do sistema.

P. 84 Temos 50 g de vapor de água a 120 °C. Que quantidade de calor deve ser perdida até o sistema ser formado por 50 g de água líquida a 70 °C? Sabe-se que o vapor se condensa a 100 °C com calor latente $L_C = -540$ cal/g. Os calores específicos valem 0,48 cal/g · °C para o vapor e 1,0 cal/g · °C para o líquido. Construa ainda a curva de resfriamento correspondente ao processo.

P. 85 Um corpo, inicialmente líquido, de 50 g, sofre o processo calorimétrico representado graficamente abaixo.
Determine:

a) o calor latente da mudança de fase (vaporização) ocorrida;

b) a capacidade térmica do corpo antes e depois da mudança de fase;

c) o calor específico da substância no estado líquido e no estado de vapor.

P. 86 Num bloco de gelo em fusão faz-se uma cavidade onde são colocados 80 g de um metal de calor específico 0,03 cal/g · °C a 200 °C. Calcule a massa de água que se forma até o equilíbrio térmico. O calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g.

P. 87 Num recipiente há uma grande quantidade de água a 100 °C, sob pressão normal. Ao se colocar nela um bloco metálico de 500 g a 270 °C, qual será a massa de vapor que se forma em virtude da troca de calor entre o bloco e a água? Suponha não haver perdas de calor para o ambiente e adote $L_V = 540$ cal/g (calor latente de vaporização da água) e $c = 0{,}40$ cal/g · °C (calor específico do metal).

P. 88 Num recipiente de capacidade térmica 30 cal/°C há 20 g de um líquido de calor específico 0,5 cal/g · °C, a 60 °C. Colocando-se nesse líquido 10 g de gelo em fusão, qual será a temperatura final de equilíbrio, admitindo-se que o sistema está termicamente isolado do ambiente? O calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g e o calor específico da água é 1 cal/g · °C.

P. 89 Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, são colocados 10 g de gelo a 0 °C, sob pressão normal, e 10 g de água à temperatura θ. Sendo 80 cal/g o calor latente de fusão do gelo e 1,0 cal/g · °C o calor específico da água, determine o valor da temperatura θ para que, no equilíbrio térmico, reste apenas água a 0 °C.

P. 90 Misturam-se, num calorímetro de capacidade térmica desprezível, 200 g de gelo a 0 °C com 200 g de água a 40 °C. Sendo 80 cal/g o calor latente de fusão do gelo e 1,0 cal/g · °C o calor específico da água, determine:

a) a temperatura de equilíbrio térmico;

b) a massa de gelo que se funde.

P. 91 Um bloco de gelo de massa 500 g a −10 °C é colocado num calorímetro de capacidade térmica 9,8 cal/°C. Faz-se chegar, então, a esse calorímetro, vapor de água a 100 °C em quantidade suficiente para o equilíbrio térmico se dar a 50 °C. Sendo $L_F = 80$ cal/g o calor latente de fusão do gelo e $L_C = -540$ cal/g o calor latente de condensação do vapor a 100 °C, calcule a massa de vapor introduzida no calorímetro (dados: $c_{água} = 1{,}0$ cal/g · °C; $c_{gelo} = 0{,}50$ cal/g · °C).

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Determinação da potência de uma fonte de calor*

2 O fenômeno da superfusão

Ao se resfriar um líquido, é possível ocasionalmente ocorrer um atraso na solidificação e o líquido atingir, sem mudar de fase, temperaturas inferiores à de solidificação (**fig. 7**). Esse fenômeno excepcional é denominado **superfusão** ou **sobrefusão**. O líquido em estado de superfusão é instável, de modo que a simples agitação do sistema ou a colocação de um fragmento sólido interrompe o fenômeno, com a solidificação parcial ou total do líquido acompanhada de elevação da temperatura.

Uma situação comum em que acontece a superfusão é quando guardamos garrafas de cerveja ou de refrigerante no congelador. Ao pegarmos uma delas, sem o devido cuidado, costuma haver o congelamento de parte do líquido que estava em superfusão.

Em condições especiais, utilizando tubos capilares, já se conseguiu levar a água, sob pressão normal, à temperatura de −20 °C, em superfusão.

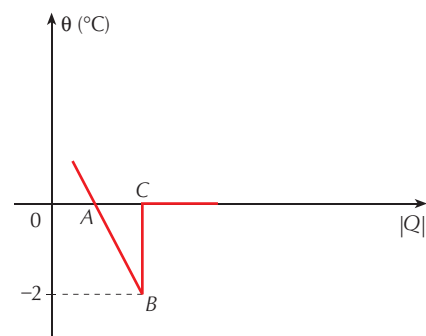



Figura 7. **Superfusão da água:**
AB **– água em superfusão, alcançando temperatura inferior a 0 °C;**
BC **– interrupção do fenômeno, ocorrendo solidificação parcial da água e elevação da temperatura até 0 °C.**

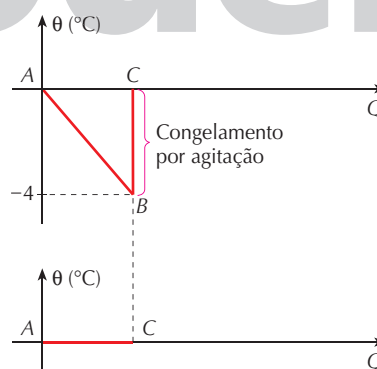
EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 34 A água de um recipiente, sob pressão normal, encontra-se em superfusão a −4 °C. Se o sistema for agitado, parte dessa água congela-se bruscamente. Sendo −80 cal/g o calor latente de solidificação da água e 1 cal/g · °C seu calor específico, calcule a proporção de água que se congela.

Solução:
Vamos indicar por M a massa total de água no recipiente e por m a massa que se congela ao se agitar o sistema. À medida que sua temperatura cai de 0 °C a −4 °C (superfusão), a massa M de água perde uma quantidade de calor Q (trecho AB do gráfico), dada por:

$$Q = M \cdot c \cdot \Delta\theta, \text{ sendo } c = 1 \text{ cal/g} \cdot {}^\circ\text{C e } \Delta\theta = -4\ {}^\circ\text{C}$$

$$Q = M \cdot 1 \cdot (-4)$$

$$Q = -4M \quad ①$$

Se não tivesse ocorrido a superfusão, quando o sistema perdesse a mesma quantidade de calor Q, certa massa m de água teria sofrido congelamento (patamar AC do gráfico). Assim:

$$Q = m \cdot L_S, \text{ sendo } L_S = -80 \text{ cal/g}$$

$$Q = m \cdot (-80)$$

$$Q = -80m \quad ②$$

A massa m de gelo que se forma ao ser agitado o sistema em superfusão é a mesma massa que teria se formado numa solidificação normal. Desse modo, igualando as expressões ① e ②, obtemos:

$$-4M = -80m \Rightarrow m = \frac{4M}{80} \Rightarrow \boxed{m = \frac{M}{20}}$$

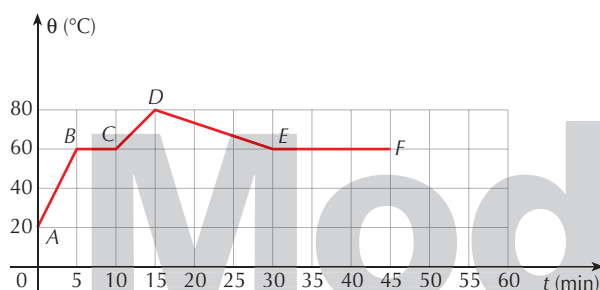
Resposta: Congela-se $\frac{1}{20}$ da massa total, isto é, 5%.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 92 Determine a temperatura de 100 g de água em superfusão, sabendo que a interrupção do fenômeno por agitação produz o congelamento brusco de 2 g do líquido. O calor latente de solidificação da água é −80 cal/g e o calor específico da água é 1 cal/g · °C.

P. 93 (UFPA) Para o fósforo, a temperatura de fusão é 44 °C, o calor específico no estado líquido é 0,2 cal/g · °C e o calor latente de fusão, 5 cal/g. Uma certa massa de fósforo é mantida em sobrefusão a 30 °C. Num certo instante verifica-se uma solidificação brusca. Que fração do total de massa do fósforo se solidifica?

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

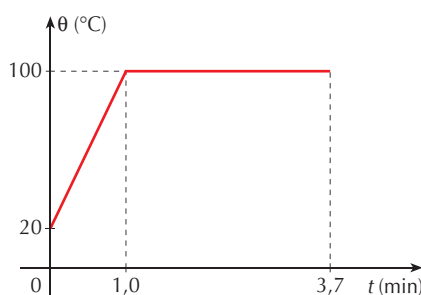
P. 94 (Fuvest-SP) Determinada massa de uma substância, inicialmente no estado sólido, encontra-se num recipiente. Um elemento aquecedor, que lhe fornece uma potência constante, é ligado no instante $t = 0$ e desligado num certo instante. O gráfico indica a temperatura θ da substância em função do tempo.

a) Em que instante o aquecedor foi desligado e em que intervalo de tempo a substância está totalmente sólida?

b) Descreva que fenômeno físico ocorre no trecho *BC* e que fenômeno físico ocorre no trecho *EF*.

P. 95 (Fuvest-SP) O gráfico representa a temperatura θ (°C) em função do tempo de aquecimento (em minutos) da água contida numa panela que está sendo aquecida por um fogão. A panela contém inicialmente 0,2 kg de água e a potência calorífica fornecida pelo fogão é constante. O calor latente de vaporização da água é 540 cal/g e o calor específico da água líquida é 1,0 cal/g · °C.

Determine:

a) a quantidade de calor absorvida pela água no primeiro minuto;

b) a massa de água que ainda permanece na panela após 3,7 min de aquecimento.

P. 96 (PUC-SP) Suponha que tomemos 500 g de água e 500 g de álcool etílico, à pressão atmosférica normal, ambos à temperatura de 20 °C, e aqueçamos as duas substâncias em recipientes idênticos, fornecendo-lhes a mesma quantidade de calor (4.000 cal/min), durante 2,0 min. O calor específico médio da água é 1,00 cal/g · °C e o do álcool é 0,58 cal/g · °C.

Dados: temperatura de ebulição do álcool = 78 °C (à pressão de 760 mmHg); calor latente de ebulição do álcool = 204 cal/g.

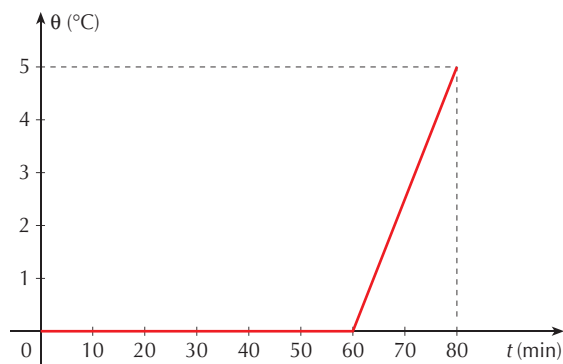
a) Qual substância se aqueceria mais? Determine a temperatura final de cada uma.

b) Calcule a quantidade de calor que seria recebida pelos 500 g de álcool, inicialmente a 20 °C, se ele fosse aquecido até a sua completa vaporização. Construa a curva da **temperatura** em função da **quantidade de calor** recebida pelo álcool.

P. 97 (Olimpíada Brasileira de Física) Dentro de um recipiente existem 2.400 g de água e um pedaço de gelo. O recipiente é colocado no fogão em uma chama branda que fornece calor a uma razão constante. A temperatura foi monitorada durante 80 minutos e o resultado é representado no gráfico ao lado.

O calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g e o calor específico da água líquida é 1 cal/g · °C. Calcule:

a) a massa inicial do gelo;

b) a taxa de calor transferida ao sistema por minuto.

P. 98 (Vunesp) O gálio é um metal cujo ponto de fusão é 30 °C, à pressão normal; por isso, ele pode liquefazer-se inteiramente quando colocado na palma da mão de uma pessoa. Sabe-se que o calor específico e o calor latente de fusão do gálio são, respectivamente, 410 J/kg · °C e 80.000 J/kg.

a) Qual a quantidade de calor que um fragmento de gálio de massa 25 g, inicialmente a 10 °C, absorve para fundir-se integralmente quando colocado na mão de uma pessoa?

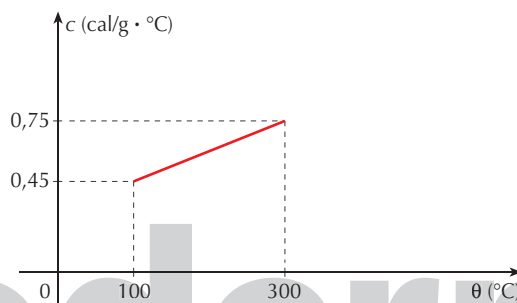
b) Construa o gráfico T (°C) × Q (J) que representa esse processo, supondo que ele comece a 10 °C e termine quando o fragmento de gálio se funde integralmente.

P. 99 (Uerj) Algumas máquinas de um navio operam utilizando vapor-d'água à temperatura de 300 °C. Esse vapor é produzido por uma caldeira alimentada com óleo combustível, que recebe água à temperatura de 25 °C. O gráfico mostra o comportamento do calor específico c do vapor-d'água em função da temperatura θ.

a) Considerando as condições descritas, calcule a quantidade de calor necessária para transformar $1{,}0 \cdot 10^5$ g de água a 25 °C em vapor a 300 °C.

b) Admita que:

- a queima de 1 grama do óleo utilizado libera 10.000 cal;
- a caldeira, em 1 hora, queima 4.320 g de óleo e seu rendimento é de 70%.

Determine a potência útil dessa caldeira (dados: calor latente de vaporização da água = 540 cal/g; calor específico da água = 1,0 cal/g °C).

P. 100 (UFG-GO) Um lago tem uma camada superficial de gelo com espessura de 4,0 cm a uma temperatura de −16 °C. Determine em quanto tempo o lago irá descongelar sabendo que a potência média por unidade de área da radiação solar incidente sobre a superfície da Terra é 320 W/m² (dados: calor específico do gelo = 0,50 cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g; densidade do gelo = 1,0 g/cm³; 1,0 cal = 4,0 J).

P. 101 (Fuvest-SP) Utilizando pedaços de alumínio a 0 °C, pretende-se resfriar 1.100 g de água, inicialmente a 42 °C. Sendo os calores específicos 1,00 cal/g · °C para a água e 0,22 cal/g · °C para o alumínio, e 80 cal/g o calor latente de fusão do gelo, pergunta-se:

a) Qual é a massa de alumínio necessária para baixar de 2 °C a temperatura da água?

b) De posse de uma grande quantidade de alumínio a 0 °C, seria possível transformar toda a água em gelo?

c) Se o alumínio estiver a −20 °C, que massa mínima do metal será necessária para efetuar a transformação referida no item anterior?

P. 102 (EEM-SP) Num calorímetro foram colocados um bloco de gelo de massa m_G = 0,48 kg, à temperatura de −20 °C, e um corpo metálico de massa m = 50 g à temperatura de 600 °C. Atingido o equilíbrio térmico, observou-se o aparecimento de uma massa m_A = 15 g de água proveniente da fusão do gelo. São dados c_G = 0,50 cal/g · °C (calor específico do gelo) e L_F = 80 cal/g (calor latente de fusão do gelo).

a) Determine o calor específico do metal do corpo.

b) Determine a quantidade de calor utilizada na fusão do gelo.

P. 103 (UFRJ) Em um calorímetro de capacidade térmica desprezível, há 200 g de gelo a −20 °C. Introduz-se, no calorímetro, água a 20 °C. O calor latente de solidificação da água é −80 cal/g e os calores específicos do gelo e da água (líquida) valem, respectivamente, 0,50 cal/g · °C e 1,0 cal/g · °C. Calcule o valor máximo da massa da água introduzida a fim de que, ao ser atingido o equilíbrio térmico, haja apenas gelo no calorímetro.

P.104 (Vunesp) Um recipiente de capacidade térmica desprezível e isolado termicamente contém 25 kg de água à temperatura de 30 °C.

a) Determine a massa de água a 65 °C que se deve despejar no recipiente para se obter uma mistura em equilíbrio térmico à temperatura de 40 °C.

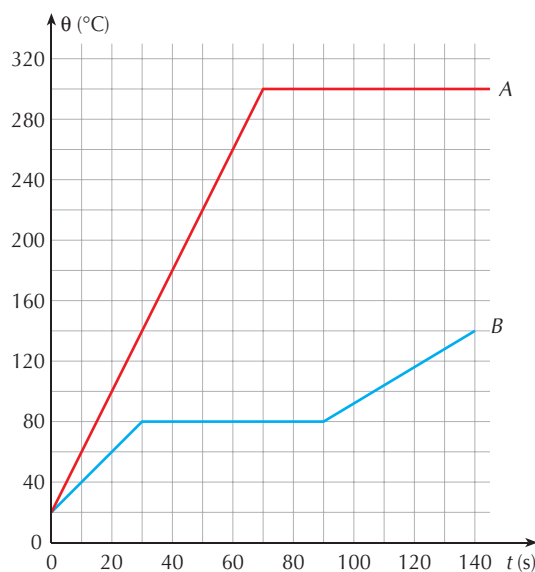
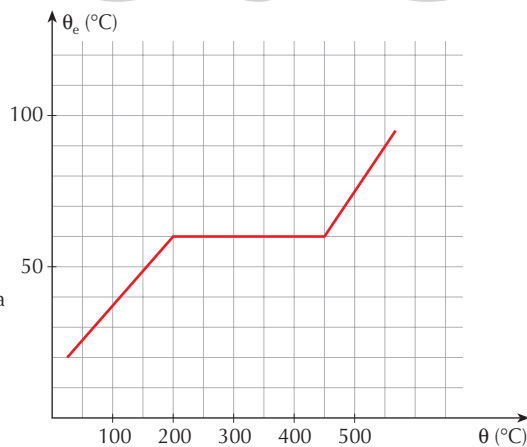
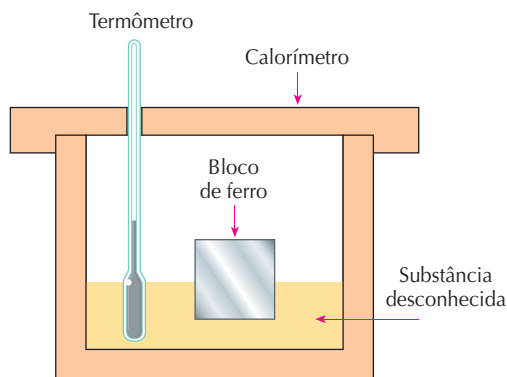
b) Se, em vez de 40 °C, quiséssemos uma temperatura final de 20 °C, qual seria a massa de gelo a 0 °C que deveríamos juntar aos 25 kg de água a 30 °C?

Considere o calor específico da água igual a 4,0 J/g · °C e o calor latente de fusão do gelo igual a 320 J/g.

P.105 (Fuvest-SP) As curvas *A* e *B* na figura representam a variação da temperatura (θ) em função do tempo (*t*) de duas substâncias A e B, quando 50 g de cada uma são aquecidos separadamente, a partir da temperatura de 20 °C, na fase sólida, recebendo calor numa taxa constante de 20 cal/s. Considere agora um experimento em que 50 g de cada uma das substâncias são colocados em contato térmico num recipiente termicamente isolado, com a substância *A* na temperatura inicial θ_A = 280 °C e a substância *B* na temperatura inicial θ_B = 20 °C.

a) Determine o valor do calor latente de fusão L_B da substância *B*.

b) Determine a temperatura de equilíbrio do conjunto no final do experimento.

c) Se a temperatura final corresponder à mudança de fase de uma das substâncias, determine a quantidade dela em cada uma das fases.

P.106 (Fuvest-SP) Um pesquisador estuda a troca de calor entre um bloco de ferro e certa quantidade de uma substância desconhecida, dentro de um calorímetro de capacidade térmica desprezível. Em sucessivas experiências, ele coloca no calorímetro a substância desconhecida, sempre no estado sólido, à temperatura θ_0 = 20 °C, e o bloco de ferro, a várias temperaturas iniciais θ, medindo em cada caso a temperatura final de equilíbrio térmico θ_e. O gráfico representa o resultado das experiências.

A razão das massas do bloco de ferro e da substância desconhecida é $\frac{m_f}{m_s}$ = 0,8. Considere o valor do calor específico do ferro igual a 0,1 cal/g · °C. A partir dessas informações, determine para a substância desconhecida:

a) a temperatura de fusão ($\theta_{fusão}$);

b) o calor específico (c_s) na fase sólida;

c) o calor latente de fusão (*L*).

P.107 (Olimpíada Paulista de Física) Duas estudantes debatiam entusiasticamente sobre o processo de formação de gelo em nuvens. A primeira, chamada Lia, dizia: "Sabemos que a água se congela à temperatura de 0 °C, assim o gelo nas nuvens tem que se formar a uma temperatura próxima desse valor". A outra aluna, Marceli, tinha uma ideia bastante diferente; ela dizia: "Se dividirmos uma quantidade de água em pequenas gotículas, então a água pode super-resfriar-se até −40 °C. Assim, o gelo formado nas nuvens pode estar a uma temperatura muito mais baixa que 0 °C". Com qual das duas alunas você concorda? Justifique.

P.108 (Fuvest-SP) Quando água pura (c = 1 cal/g · °C) é cuidadosamente resfriada, nas condições normais de pressão, pode permanecer no estado líquido até temperaturas inferiores a 0 °C, num estado instável de "superfusão". Se o sistema é perturbado, por exemplo, por vibração, parte da água se transforma em gelo e o sistema se aquece até se estabilizar em 0 °C. O calor latente de fusão da água é L = 80 cal/g.
Considerando um recipiente termicamente isolado e de capacidade térmica desprezível, contendo 1 litro de água a −5,6 °C, à pressão normal, determine:

a) a quantidade, em gramas, de gelo formada, quando o sistema é perturbado e atinge uma situação de equilíbrio a 0 °C;

b) a temperatura final de equilíbrio do sistema e a quantidade de gelo existente (considerando-se o sistema inicial no estado de "superfusão" a −5,6 °C), ao colocar-se, no recipiente, um bloco metálico de capacidade térmica C = 400 cal/°C, na temperatura de 91 °C.

TESTES PROPOSTOS

T.90 (Mackenzie-SP) Durante um trabalho em laboratório, dois estudantes resolveram comparar seus resultados. O primeiro, A, aqueceu uma massa de gelo (água no estado sólido) a partir da temperatura de −10 °C e "levou-a" ao estado líquido, até a temperatura de 20 °C. O segundo, B, resfriou uma massa de água, igual à do primeiro, a partir da temperatura 10 °C e "levou-a" ao estado sólido, até a temperatura de −20 °C (dados: calor específico do gelo = 0,500 cal/g · °C; calor específico da água líquida = 1,000 cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo = 80,0 cal/g). A relação entre o valor absoluto da quantidade de calor recebida pela primeira massa de água (Q_A) e o valor absoluto da quantidade de calor perdida pela segunda (Q_B) é:

a) $\frac{Q_A}{Q_B} = 0{,}05$

b) $\frac{Q_A}{Q_B} = 0{,}55$

c) $\frac{Q_A}{Q_B} = 0{,}95$

d) $\frac{Q_A}{Q_B} = 1{,}05$

e) $\frac{Q_A}{Q_B} = 1{,}5$

T.91 (UEMG) Quer-se determinar a quantidade de calor que devemos fornecer a 200 g de chumbo para que sua temperatura varie de 30 °C para 400 °C. Dados: temperatura de fusão do chumbo = 330 °C; calor latente de fusão do chumbo = 5 cal/g; calor específico do chumbo no estado sólido = 0,03 cal/g · °C; calor específico do chumbo no estado líquido = = 0,04 cal/g · °C. A quantidade total de calor, em calorias, no processo será igual a:

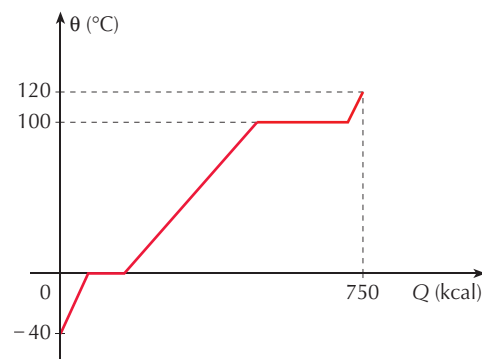
a) 3.360
b) 2.250
c) 3.000
d) 900
e) 4.260

T.92 (Udesc) Uma pequena metalúrgica funde diariamente 0,5 tonelada de alumínio, em 5 etapas diferentes, de 100 kg cada. O processo de fusão é feito com um forno a gás natural que trabalha continuamente. Visando diminuir os custos com o consumo de combustível, o encarregado da fundição precisa calcular a energia necessária para fundir os 100 kg de alumínio e medir a energia consumida, por meio de um instrumento próprio. Na tabela mostrada a seguir foi anotada a energia consumida nesse processo de fusão.

Massa de alumínio (kg)	Energia consumida ($\times 10^6$ J)
100	122
100	120
100	121
100	122
100	120

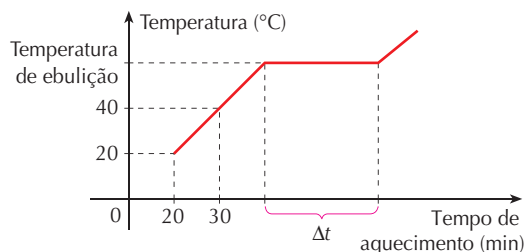
Sabendo que o calor específico do alumínio é de 900 J/kg · K, que o calor latente de fusão é igual a 400 · 10^3 J/kg e que a temperatura de fusão do alumínio é 660 °C, calcule o percentual de perda de energia do forno. Considere que a temperatura ambiente é igual a 25 °C.

a) 100%
b) 120%
c) 24%
d) 20%
e) 5%

T.93 (Mackenzie-SP) A quantidade de calor que um bloco de gelo (água no estado sólido), inicialmente a −40 °C, recebe para chegar a ser vapor a 120 °C é dada pelo gráfico abaixo.

(Dados: $L_{f_{gelo}}$ = 80 cal/g; $L_{v_{água}}$ = 540 cal/g; $c_{gelo} = c_{vapor}$ = 0,50 cal/g · °C; $c_{água\ líquida}$ = 1,0 cal/g · °C)

A massa desse gelo é:

a) 1,0 g
b) 10 g
c) 1,0 · 10^2 g
d) 1,0 kg
e) 10 kg

T. 94 (PUC-SP) O gráfico representa um trecho, fora de escala, da curva de aquecimento de 200 g de uma substância, aquecida por uma fonte de fluxo constante e igual a 232 cal/min.

Substância	Calor específico no estado líquido (cal/g · °C)	Calor latente de ebulição (cal/g)
Água	1,00	540
Acetona	0,52	120
Ácido acético	0,49	94
Álcool etílico	0,58	160
Benzeno	0,43	98

Sabendo que a substância em questão é uma das apresentadas na tabela, o intervalo de tempo Δt é, em minutos, um valor:

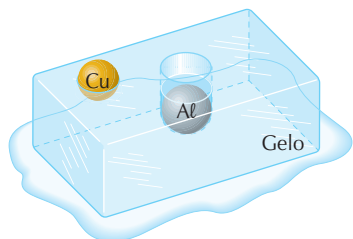
a) acima de 130.
b) entre 100 e 130.
c) entre 70 e 100.
d) entre 20 e 70.
e) menor do que 20.

T. 95 (Mackenzie-SP) No interior de um calorímetro de capacidade térmica desprezível, que contém óleo (c = 0,3 cal/g · °C) a 30 °C, colocamos uma pedra de gelo (calor latente de fusão = 80 cal/g) de 40 g a 0 °C. A massa de água (calor específico = 1 cal/g · °C) a 70 °C que devemos adicionar no calorímetro para restabelecer a temperatura inicial do óleo é de:

a) 80 g b) 90 g c) 100 g d) 110 g e) 150 g

T. 96 (UCPel-RS) Um calorímetro cuja capacidade térmica é igual a 20 cal/°C contém 300 g de água. A temperatura do sistema calorímetro-água é de 40 °C, inicialmente. Adicionando-se à água 500 g de gelo fundente (0 °C), qual será a massa de gelo derretida até o estabelecimento do equilíbrio térmico? (Dados: calor específico da água = 1,0 cal/g · °C; calor de fusão do gelo = 80 cal/g)

a) 500 g b) 300 g c) 340 g d) 150 g e) 160 g

T. 97 (UFMG) Júlia coloca uma esfera de cobre e uma de alumínio, ambas de mesma massa e à mesma temperatura, sobre um bloco de gelo. Após um certo tempo, ela observa que essas esferas permanecem em equilíbrio nas posições indicadas na figura a seguir:

Todas as dimensões estão representadas em escala na figura. Sejam d_{Cu} e $d_{A\ell}$ as densidades e c_{Cu} e $c_{A\ell}$ os calores específicos, respectivamente, do cobre e do alumínio. Com base nessas informações, é correto afirmar que:

a) $d_{Cu} < d_{A\ell}$ e $c_{Cu} > c_{A\ell}$
b) $d_{Cu} > d_{A\ell}$ e $c_{Cu} < c_{A\ell}$
c) $d_{Cu} < d_{A\ell}$ e $c_{Cu} < c_{A\ell}$
d) $d_{Cu} > d_{A\ell}$ e $c_{Cu} > c_{A\ell}$

T. 98 (Unifor-CE) Num calorímetro, de capacidade térmica 70 cal/°C, contendo 100 g de água a 20 °C, são colocados 100 g de gelo a −20 °C (dados: calor específico da água = 1,0 cal/g · °C; calor específico do gelo = 0,50 cal/g · °C; calor latente de fusão do gelo = 80 cal/g). Quando atingido o equilíbrio, no interior do calorímetro, tem-se:

a) só gelo a 0 °C.
b) só água a 0 °C.
c) 130 g de água e 70 g de gelo a 0 °C.
d) 150 g de água e 50 g de gelo a 0 °C.
e) 170 g de água e 30 g de gelo a 0 °C.

T. 99 (ITA-SP) Um bloco de gelo com 725 g de massa é colocado num calorímetro contendo 2,50 kg de água a uma temperatura de 5,0 °C, verificando-se um aumento de 64 g na massa desse bloco, uma vez alcançado o equilíbrio térmico. Considere o calor específico da água (c = 1,0 cal/g · °C) o dobro do calor específico do gelo, e o calor latente de fusão do gelo de 80 cal/g. Desconsiderando a capacidade térmica do calorímetro e a troca de calor com o exterior, assinale a temperatura inicial do gelo.

a) −191,4 °C
b) −48,6 °C
c) −34,5 °C
d) −24,3 °C
e) −14,1 °C

T. 100 (Unifesp) Sobrefusão é o fenômeno em que um líquido permanece nesse estado a uma temperatura inferior à de solidificação, para a correspondente pressão. Esse fenômeno pode ocorrer quando um líquido cede calor lentamente, sem que sofra agitação. Agitado, parte do líquido solidifica, liberando calor para o restante, até que o equilíbrio térmico seja atingido à temperatura de solidificação para a respectiva pressão. Considere uma massa de 100 g de água em sobrefusão à temperatura de −10 °C e pressão de 1 atm, o calor específico da água de 1 cal/g · °C e o calor latente de solidificação da água de −80 cal/g. A massa de água que sofrerá solidificação se o líquido for agitado será:

a) 8,7 g
b) 10,0 g
c) 12,5 g
d) 50,0 g
e) 60,3 g

T. 101 (ITA-SP) Um corpo indeformável em repouso é atingido por um projétil metálico com a velocidade de 300 m/s e à temperatura de 0 °C. Sabe-se que, devido ao impacto, $\frac{1}{3}$ da energia cinética é absorvida pelo corpo e o restante transforma-se em calor, fundindo parcialmente o projétil. O metal tem ponto de fusão T_f = 300 °C, calor específico c = 0,02 cal/g · °C e calor latente de fusão L_f = 6 cal/g. Considerando 1 cal ≃ 4 J, a fração x da massa total do projétil metálico que se funde é tal que:

a) $x < 0,25$
b) $x = 0,25$
c) $0,25 < x < 0,5$
d) $x = 0,5$
e) $x > 0,5$

UNIDADE C

Capítulo 6

Diagramas de fases

O fato de a pressão influenciar diretamente a temperatura de mudança de fase de uma substância é utilizado em diversas aplicações práticas, como, por exemplo, o funcionamento da panela de pressão, a geração de energia elétrica em uma usina termonuclear ou no armazenamento, em cilindros, de gases de uso hospitalar, como o gás oxigênio. Também os fenômenos meteorológicos, como a ocorrência de chuvas de granizo, estão relacionados com a pressão e a temperatura da água em diferentes altitudes na atmosfera.

A fase na qual uma substância pura se encontra ou a ocorrência de mudanças de fases podem ser analisadas por meio do diagrama de fases, que é a representação gráfica da pressão em função da temperatura.

6.1 Diagrama de fases

A fase em que uma substância pura se apresenta depende da pressão e da temperatura à qual está submetida.

6.2 Equilíbrio sólido-líquido. Fusão e solidificação

Sob a mesma pressão, a fusão e a solidificação de uma substância ocorrem à mesma temperatura.

6.3 Equilíbrio líquido-vapor. Ebulição e condensação

Sob a mesma pressão, a ebulição e a condensação de uma substância ocorrem à mesma temperatura.

6.4 Pressão máxima de vapor. Isotermas de Andrews

Gás é a substância na fase gasosa em uma temperatura superior à temperatura crítica.

6.5 Umidade do ar. Evaporação

A velocidade de evaporação de um líquido depende da natureza do líquido, da sua temperatura, da área de sua superfície livre, da pressão externa e da umidade do ambiente.

6.6 Equilíbrio sólido-vapor. Sublimação

A maioria das substâncias pode sublimar, dependendo das condições físicas a que estiver submetida.

Seção 6.1

Diagrama de fases

Objetivos

- Relacionar a pressão e a temperatura ao estado de uma substância.
- Analisar um diagrama de fases.
- Conceituar ponto triplo.

Termos e conceitos

- diagrama de fases
- estado de uma substância
- curva de fusão
- curva de vaporização
- curva de sublimação

A fase em que uma substância se encontra depende de suas condições de pressão e de temperatura, podendo estar também num **estado*** que corresponda ao equilíbrio entre duas fases ou mesmo entre as três fases. Representando os diferentes estados da substância no gráfico $p \times \theta$, obtemos o denominado diagrama de fases da substância.

Na **figura 1** apresentamos, fora de escala, o **diagrama de fases** para o dióxido de carbono (CO_2), e na **figura 2**, para a água.

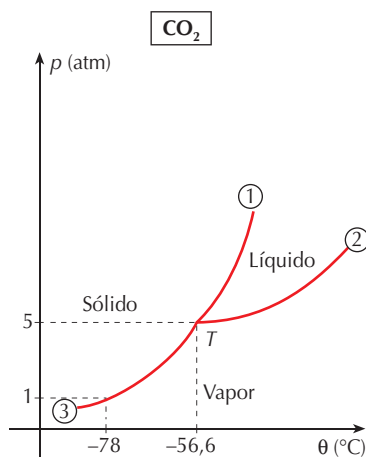



Figura 1. Diagrama de fases do CO_2.

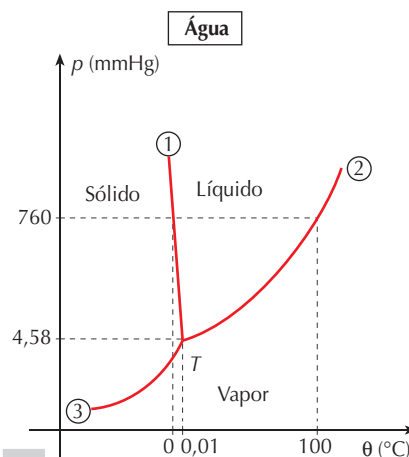



Figura 2. Diagrama de fases da água.

No diagrama de fases, a curva que delimita as regiões correspondentes às fases sólida e líquida constitui a curva de fusão (1), representativa dos estados de equilíbrio entre o sólido e o líquido. A curva que separa as regiões que correspondem às fases líquida e de vapor é a curva de vaporização (2), cujos pontos representam os estados de equilíbrio entre o líquido e o vapor. A curva de sublimação, entre as regiões das fases sólida e de vapor (3), figura os estados de equilíbrio entre essas duas fases.

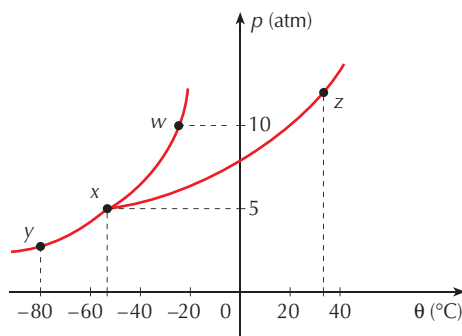
O estado representado pelo ponto comum às três curvas (*T*) é denominado **ponto triplo** ou **ponto tríplice** e corresponde ao equilíbrio entre as três fases da substância. Assim, sob pressão de 4,58 mmHg e à temperatura de 0,01 °C, podemos obter para a água um sistema constituído por gelo, água líquida e vapor de água, em equilíbrio. Para o dióxido de carbono, essa situação de coexistência das três fases em equilíbrio é obtida sob pressão de 5 atm e à temperatura de −56,6 °C.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.galileo.fr.it/marc/termologia_e_termodinamica/diagramma_equilibrio/hplab.htm (acesso em julho/2009), você poderá, por meio de uma simulação, verificar em que fase uma substância se encontra conforme o valor da pressão e da temperatura.
No endereço eletrônico http://www.galileo.fr.it/marc/chimica/transizione/phase.htm (acesso em julho/2009), você poderá variar a temperatura (em K) com o cursor e verificar na tabela periódica a fase em que se encontram os vários elementos químicos.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Animação: *Diagrama de fases*

* Estado de uma substância é a situação em que ela se apresenta num dado instante, sendo caracterizado pelos valores de sua temperatura (θ), de sua pressão (*p*) e de seu volume (*V*).

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 35 É dado o diagrama de fases de uma substância.

a) O que representam os pontos *x*, *y*, *w* e *z* assinalados no gráfico?

b) Sob pressão normal (1 atm) e à temperatura ambiente (20 °C), em que fase se encontra a substância?

c) Assinale no diagrama as regiões correspondentes às fases sólida, líquida e de vapor.

Solução:

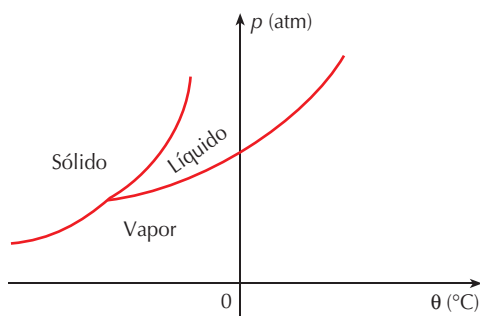
a) O ponto *x*, comum às três curvas do diagrama, é o ponto triplo, representativo da coexistência em equilíbrio das três fases (sólida, líquida e gasosa) da substância.

O ponto *y* pertence à curva de sublimação e, portanto, representa um estado de equilíbrio entre as fases sólida e de vapor.

O ponto *w* está sobre a curva de fusão, representando um estado de equilíbrio entre as fases sólida e líquida.

O ponto *z*, situado na curva de vaporização, representa um estado de equilíbrio entre as fases líquida e de vapor.

b) A pressão normal, 1 atm, e a temperatura ambiente, 20 °C, definem um estado da substância situado, no diagrama de fases, à direita das curvas de vaporização e de sublimação, correspondendo, portanto, à fase de vapor.

c) No diagrama abaixo, estão indicadas as regiões correspondentes às fases sólida, líquida e de vapor.

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 109 Dado o diagrama de fases de uma substância, pergunta-se:

a) Que mudança de fase ocorre quando a substância passa do estado *A* para o estado *B*?

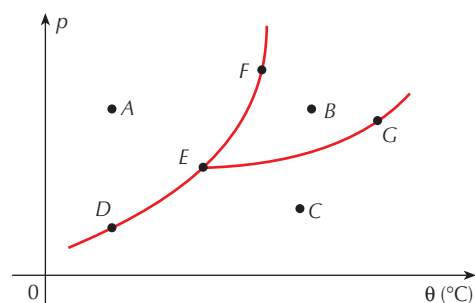
b) Que mudança de fase ocorre na passagem do estado *B* para o estado *C*?

c) Em que fase pode encontrar-se a substância no estado representado pelo ponto *D*?

d) E nos estados representados pelos pontos *E*, *F* e *G*?

e) Qual dos pontos assinalados no diagrama é o ponto triplo ou tríplice e por que recebe esse nome?

Seção 6.2

Equilíbrio sólido-líquido. Fusão e solidificação

Objetivos

- Conceituar calor latente de fusão e calor latente de solidificação.
- Analisar a influência da pressão no ponto de fusão para as substâncias que se dilatam e para as substâncias que se contraem na fusão.
- Descrever a experiência do regelo.

Termos e conceitos

- **temperatura de fusão**

Vimos no capítulo anterior que um sólido cristalino, ao receber calor sob pressão constante, funde-se a uma temperatura característica θ_F, a qual permanece constante durante o processo (**fig. 3**). O calor absorvido por unidade de massa, enquanto o corpo se funde, constitui o **calor latente de fusão** da substância. Durante a fusão, coexistem as fases sólida e líquida do material.

Do mesmo modo, se um líquido perder calor sob pressão constante, sofrerá solidificação à mesma temperatura na qual o sólido se funde (sob mesma pressão). Durante a solidificação, a temperatura permanece constante (**fig. 4**). O calor perdido por unidade de massa, enquanto o líquido se solidifica, é o **calor latente de solidificação** da substância, cujo valor é igual, em módulo, ao calor latente de fusão.

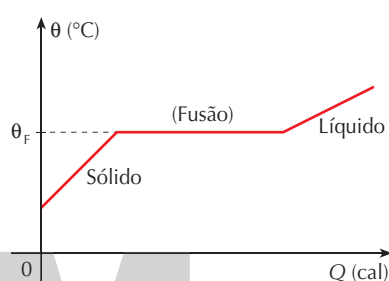



Figura 3. Curva de aquecimento de um corpo inicialmente sólido.

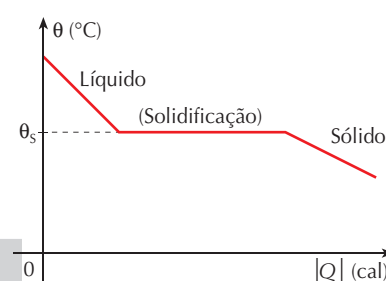
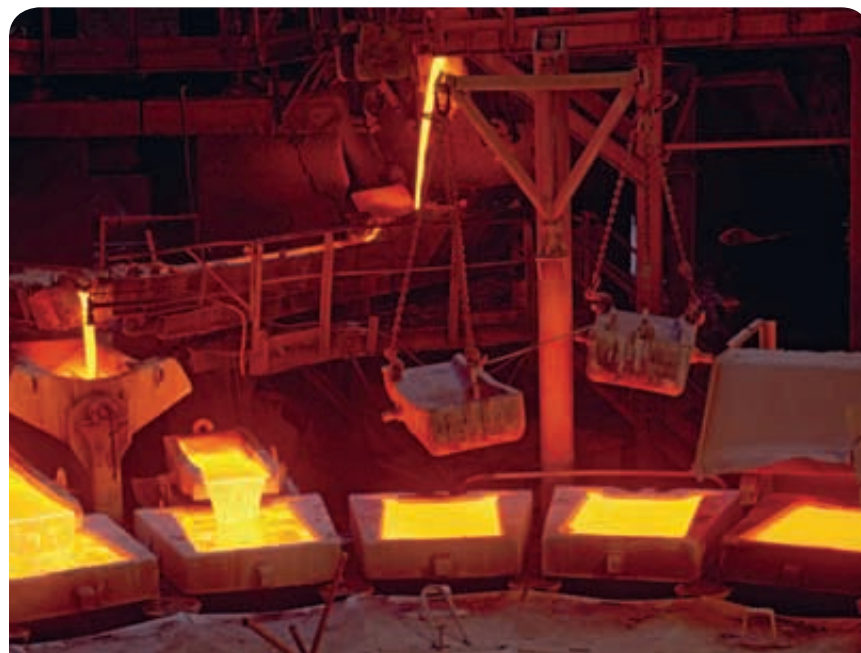



Figura 4. Curva de resfriamento de um corpo inicialmente líquido.

Para a água, os calores latentes de fusão e de solidificação sob pressão normal valem:

$$L_F = 80 \text{ cal/g} \qquad L_S = -80 \text{ cal/g}$$

Pela análise do diagrama de fases do dióxido de carbono e da água (**figs. 1 e 2**), observa-se que a temperatura de fusão (e de solidificação) depende da pressão a que a substância está submetida. Contudo, a influência da pressão sobre o ponto de fusão não se dá do mesmo modo para as duas substâncias estudadas. De modo geral, podemos estabelecer dois casos: substâncias que se dilatam na fusão e substâncias que se contraem na fusão.

Cobre liquefeito, incandescente em decorrência da alta temperatura, sendo despejado em formas.

V2_P1_UN_C_CAP_06.indd 102 22.08.09 09:26:51

1 Substâncias que se dilatam na fusão

É o que acontece com a maioria das substâncias e corresponde ao comportamento do dióxido de carbono (CO_2). Nesse caso, **o aumento da pressão faz aumentar a temperatura de fusão**. A curva de fusão apresenta o aspecto indicado na **figura 5**.

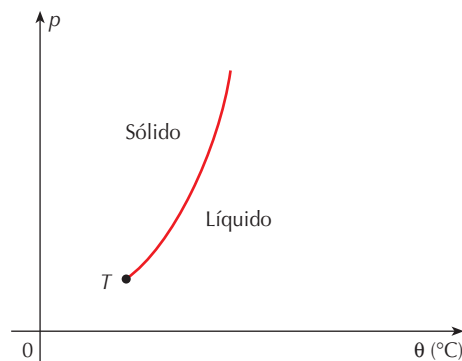



Figura 5. Curva de fusão para substâncias que se dilatam na fusão ($V_{sólido} < V_{líquido}$).

Explica-se essa influência da pressão pelo fato de as moléculas se afastarem umas das outras na fusão. O aumento de pressão, comprimindo as moléculas, dificulta sua separação, a qual somente se torna possível numa temperatura mais elevada, quando as moléculas tiverem maior grau de agitação.

Observe que, para essas substâncias, a densidade do sólido é maior que a do líquido.

2 Substâncias que se contraem na fusão

Estão nesse caso, além da água, o bismuto, o ferro e o antimônio. **O aumento da pressão faz diminuir a temperatura de fusão** dessas substâncias, porque a distância média entre suas moléculas é maior no estado sólido. Assim, a compressão das moléculas favorece a tendência natural dessa mudança de fase, que é a diminuição de volume. Na **figura 6** é apresentada a curva de fusão para essas substâncias, que apresentam a fase sólida com menor densidade que a fase líquida.

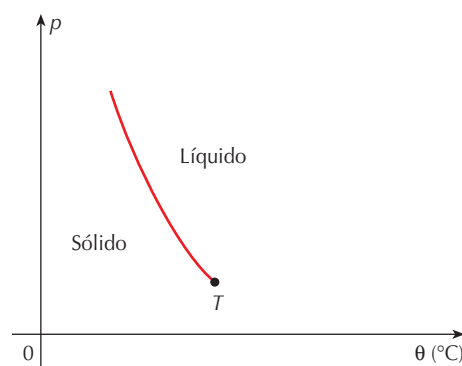



Figura 6. Curva de fusão para substâncias que se contraem na fusão ($V_{sólido} > V_{líquido}$).

O gelo, sob pressão normal, funde-se a 0 °C. Sob pressões mais elevadas, sua temperatura de fusão se reduz. Por exemplo:

$p = 1$ atm	$\theta_F = 0$ °C
$p = 8{,}1$ atm	$\theta_F = -0{,}06$ °C
$p = 135$ atm	$\theta_F = -1$ °C
$p = 340$ atm	$\theta_F = -2{,}5$ °C

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Congelamento da água*

A experiência do regelo, realizada pela primeira vez pelo físico irlandês John Tyndall (1820-1893), ilustra a influência da pressão sobre o ponto de fusão do gelo: se passarmos sobre um bloco de gelo, em temperatura pouco inferior a 0 °C, um fio fino de metal com pesos convenientemente colocados nas extremidades, o acréscimo de pressão no contato fio-gelo diminui a temperatura de fusão e produz derretimento do gelo sob o fio. O fio se desloca através da água formada, a qual se congela ao voltar à pressão normal. Assim, o fio atravessa o gelo e este permanece íntegro.

A variação do ponto de fusão do gelo com a pressão pode ser observada em outras situações. Quando um patinador desliza sobre o gelo, por exemplo, a lâmina dos patins, tendo área pequena, exerce uma pressão considerável sobre o piso. Em consequência, o gelo se derrete e a água formada funciona como um lubrificante, facilitando o deslizamento. Após a passagem do patinador, a pressão diminui e a água retorna à fase sólida.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Reproduzindo a experiência de Tyndall*

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 36 Em um recipiente termicamente isolado do exterior, coloca-se uma mistura de gelo e água a 0 °C, sob pressão normal. Fornecendo certa quantidade de calor à mistura, verificamos que a temperatura não varia e o volume do sistema diminui 0,5 cm³.

(Dados: densidades $d_{gelo} = 0{,}92$ g/cm³ e $d_{água} = 1$ g/cm³; calor latente de fusão do gelo $L_F = 80$ cal/g)

a) Explique a diminuição de volume do sistema.

b) Calcule a massa de gelo que se transforma em água líquida.

c) Determine a quantidade de calor recebida pela mistura.

Solução:

a) O volume da mistura diminui porque o gelo a 0 °C, ao receber calor, derrete, e sua fusão se verifica com **contração** de volume ($V_{gelo} > V_{água\ líquida}$).

b) Chamando de $V_{água}$ o volume da água líquida, e de V_{gelo} o volume do gelo, correspondentes à mesma massa m que derrete, a variação de volume é dada por:

$$\boxed{\Delta V = V_{água} - V_{gelo}}$$

Mas:

$$d_{água} = \frac{m}{V_{água}} \Rightarrow V_{água} = \frac{m}{d_{água}}$$

e

$$d_{gelo} = \frac{m}{V_{gelo}} \Rightarrow V_{gelo} = \frac{m}{d_{gelo}}$$

Sendo assim, obtemos:

$$\Delta V = \frac{m}{d_{água}} - \frac{m}{d_{gelo}} \Rightarrow \boxed{\Delta V = m \cdot \left(\frac{1}{d_{água}} - \frac{1}{d_{gelo}}\right)}$$

Por essa fórmula, observe que, ao ocorrer a mudança de fase, a **variação de volume ΔV será diretamente proporcional à massa** da substância que sofre o processo.

Substituindo os valores fornecidos:

$\Delta V = -0{,}5\ cm^3$ (contração)

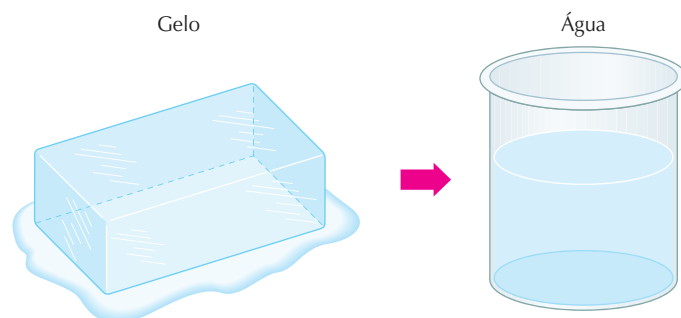
$d_{água} = 1\ g/cm^3$

$d_{gelo} = 0{,}92\ g/cm^3$

obtemos:

$$-0{,}5 = m \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{0{,}92}\right) \Rightarrow -0{,}5 = m \cdot \left(\frac{0{,}92 - 1}{0{,}92}\right) \Rightarrow -0{,}5 = m \cdot \frac{-0{,}08}{0{,}92} \Rightarrow \boxed{m = 5{,}75\ g}$$

Poderíamos chegar ao mesmo resultado de outro modo, sem deduzir a fórmula. Como a densidade do gelo é 0,92 g/cm^3 e a da água é 1 g/cm^3, para cada 0,92 g de gelo que derrete ocorre uma contração de 0,08 cm^3, conforme o esquema abaixo. Então:

$$\Delta V = V_{água} - V_{gelo}$$
$$\Delta V = 0{,}92 - 1$$
$$\Delta V = -0{,}08\ cm^3$$

A contração ocorrida é proporcional à massa de gelo que se derrete. Assim, por regra de três simples e direta:

$$\left.\begin{array}{l} 0{,}92\ g \ \text{———}\ -0{,}08\ cm^3 \\ m \ \text{———}\ -0{,}5\ cm^3 \end{array}\right\} m = \frac{0{,}92 \cdot 0{,}5}{0{,}08} \Rightarrow \boxed{m = 5{,}75\ g}$$

c) A quantidade de calor recebida é: $Q = m \cdot L_F$. Como $L_F = 80$ cal/g, temos:

$$Q = 5{,}75 \cdot 80 \Rightarrow \boxed{Q = 460\ cal}$$

Respostas: a) A fusão do gelo ocorre com contração; b) 5,75 g; c) 460 cal

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 110 Ao fundir, o gelo se contrai. A variação de volume é proporcional à massa de gelo que derrete. Sendo $d_{gelo} = 0{,}92\ g/cm^3$ a densidade do gelo a 0 °C, $d_{água} = 1\ g/cm^3$ a densidade da água a 0 °C e $L_F = 80$ cal/g o calor latente de fusão do gelo, determine:

a) a massa de gelo que deve derreter para reduzir de 2 cm^3 o volume de certa mistura de água e gelo a 0 °C;

b) a quantidade de calor recebida durante o processo.

P. 111 Numa experiência em laboratório de Biologia, um animal foi introduzido numa mistura de água e gelo, sob pressão normal. Decorrido certo tempo, houve contração de 0,64 cm^3 na mistura. No mesmo tempo, a contração teria sido 0,42 cm^3 sem a presença do animal.

a) Determine a quantidade de calor que a mistura recebe do animal no intervalo de tempo considerado, sendo dados $d_{gelo} = 0{,}92\ g/cm^3$, $d_{água} = 1\ g/cm^3$ e $L_F = 80$ cal/g.

b) Admitamos que o referido tempo seja o necessário para que o animal, inicialmente a 30 °C, entre em equilíbrio térmico com a mistura. Consideremos ainda que o animal não produza calor por processos metabólicos e que 20% do calor que ele cede se perca para o ambiente. Determine a capacidade térmica do animal.

Seção 6.3

Equilíbrio líquido-vapor. Ebulição e condensação

Objetivos

- Conceituar calor latente de vaporização e calor latente de condensação.
- Analisar a influência da pressão no ponto de ebulição para qualquer substância pura.

Termos e conceitos

- **temperatura de ebulição**
- **panela de pressão**
- **autoclave**

Conforme vimos no capítulo anterior, se fornecermos calor a uma substância pura na fase líquida, sob pressão constante, ela ferve, isto é, entra em ebulição numa temperatura θ_V característica, que permanece constante durante o processo (**fig. 7**). O calor que o líquido absorve por unidade de massa, enquanto ferve, constitui o **calor latente de vaporização** da substância. Durante a ebulição, coexistem as fases líquida e gasosa do material.

Se o vapor de uma substância pura perde calor sob pressão constante, ele se transforma em líquido (condensação ou liquefação) na mesma temperatura em que o líquido ferve (**fig. 8**). O calor perdido por unidade de massa durante essa mudança de fase é o **calor latente de condensação**, igual, em módulo, ao calor latente de vaporização.

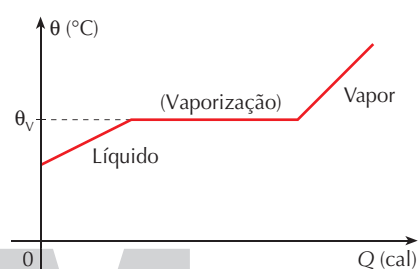



Figura 7. Curva de aquecimento de um corpo inicialmente líquido.

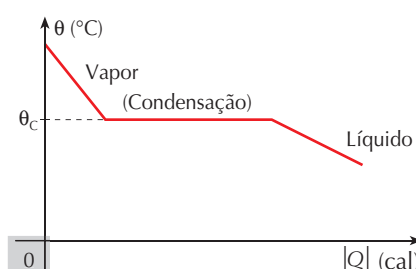



Figura 8. Curva de resfriamento de um corpo inicialmente na fase de vapor.

Para a água, os calores latentes na transição líquido-vapor, sob pressão normal, valem:

$$L_V = 540 \text{ cal/g} \qquad L_C = -540 \text{ cal/g}$$

Pela análise do diagrama de fases verificamos que a temperatura de ebulição de um líquido depende da pressão exercida sobre ele. Para qualquer substância, se a pressão externa aumentar, o líquido ferverá numa temperatura mais elevada (**fig. 9**).

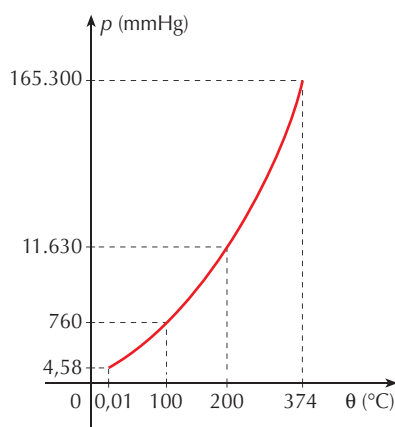



Figura 9. A curva de vaporização da água indica como a temperatura de ebulição varia com a pressão.

Esse fenômeno ocorre porque, na ebulição, há aumento de volume. Uma vez que o acréscimo de pressão comprime as moléculas umas contra as outras, torna-se mais difícil a sua separação. Assim, a vaporização somente será possível numa temperatura mais elevada, quando as moléculas tiverem maior grau de agitação.

A água, em particular, ferve a 100 °C ao nível do mar, onde a pressão atmosférica é normal (1 atm). Em maiores altitudes, a ebulição da água ocorre em temperaturas mais baixas, porque a pressão atmosférica é menor.

Na **figura 10**, indicamos esquematicamente a temperatura de ebulição da água em diferentes localidades e diferentes altitudes. De modo aproximado, podemos dizer que a temperatura de ebulição da água diminui 3 °C a cada 1 km acima do nível do mar.

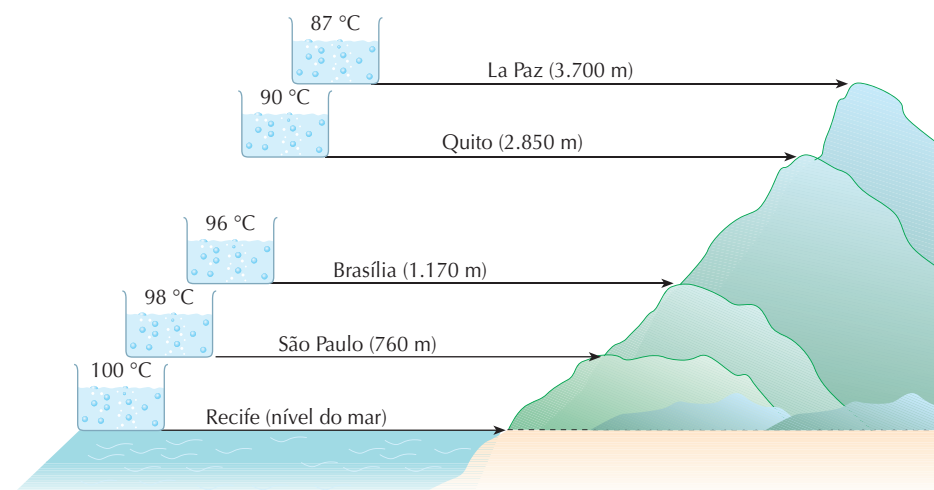



Figura 10. **A temperatura em que a água ferve depende da altitude.**

No interior de uma panela de pressão, a água está sujeita a uma pressão maior que uma atmosfera (1 atm) e, por isso, ferve a uma temperatura superior a 100 °C (**fig. 9**). Em consequência, os alimentos cozinham em menos tempo.

Figura 11. **Numa panela de pressão (foto 1), o vapor de água formado não escapa devido à presença de um contrapeso sobre o orifício de saída. Somente quando a pressão do vapor é igual à soma da pressão atmosférica com a pressão exercida pelo contrapeso é que começa a haver o escape de vapor, estabilizando a pressão interna. Nessa situação a água ferve a uma temperatura maior que 100 °C, pois a pressão sobre o líquido é maior do que 1 atm. As autoclaves (foto 2), usadas na esterilização de instrumentos cirúrgicos em hospitais e consultórios dentários, baseiam-se no mesmo princípio.**

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 112 Numa panela de pressão, a água entra em ebulição a 120 °C. Quantas calorias são necessárias para aquecer e depois vaporizar totalmente 70 g de água, cuja temperatura inicial é 50 °C? O calor latente de vaporização da água a 120 °C vale 523,1 cal/g, e o calor específico médio da água líquida é igual a 1 cal/g · °C.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Influências da pressão na ebulição da água*

Seção 6.4

Pressão máxima de vapor. Isotermas de Andrews

Objetivos

- Conceituar pressão máxima de vapor, vapor saturante e vapor seco.
- Analisar a variação da pressão e do volume de um gás à temperatura constante.
- Conceituar ponto crítico.
- Compreender a influência da temperatura na pressão máxima de vapor.

Termos e conceitos

- **transformação isotérmica**
- **vapor saturante**
- **vapor seco**

Imaginemos que, no interior de um cilindro provido de êmbolo, seja colocado vapor de dióxido de carbono (CO_2) a 10 °C e, **mantendo constante a temperatura**, seu volume seja diminuído.

Na **figura 12**, representamos as várias etapas do processo de compressão isotérmica do vapor, lançando os resultados obtidos no diagrama *pV*.

Inicialmente, à medida que o volume diminui, a pressão exercida pelo vapor aumenta, valendo, aproximadamente, a lei de Boyle (ver quadro abaixo). No gráfico a seguir, obtemos a curva *abc*.

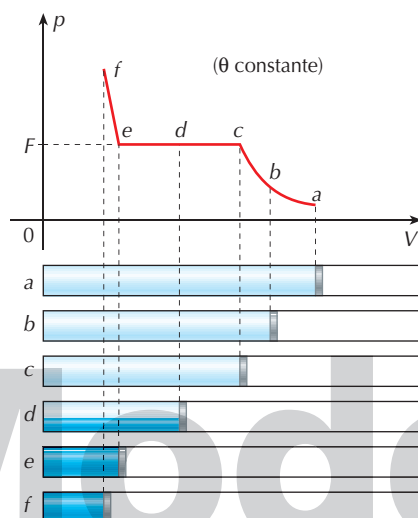



Figura 12. Compressão isotérmica de certa quantidade de vapor.

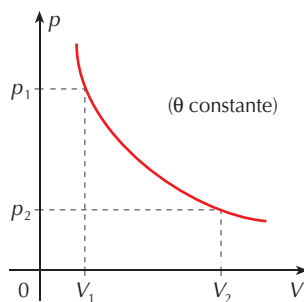
Lei de Boyle

Quando um gás sofre uma transformação em que a temperatura se mantém constante (isotérmica), variam a pressão *p*, medida por um manômetro *M*, e o volume *V*.

Verifica-se que a pressão *p* e o volume *V* relacionam-se segundo a chamada lei de Boyle:

$$p_1V_1 = p_2V_2 = \text{constante}$$

Dizemos que a pressão *p* e o volume *V* são inversamente proporcionais, isto é, quando, por exemplo, *V* duplica, *p* se reduz à metade e vice-versa.

Representando graficamente no diagrama *pV*, obtemos uma curva chamada **hipérbole equilátera**:

Prosseguindo a redução do volume, notamos que, a partir do estado *c*, ao ser atingida a pressão *F*, o vapor começa a se condensar. Durante a condensação do vapor, a pressão não mais se modifica, mantendo-se no valor *F*, e deixa de valer a lei de Boyle. Ainda no gráfico da **figura 12**, obtemos a reta *cde* paralela ao eixo dos volumes, denominada **patamar**.

No estado *e*, só existe líquido no sistema. A partir desse ponto, se o volume for diminuído, notamos que são necessárias grandes variações de pressão para produzir pequenas variações volumétricas. No gráfico, a reta *ef* é quase paralela ao eixo das pressões.

Na temperatura em que se realiza a experiência (10 °C), *F* é a maior pressão que o vapor de CO_2 pode exercer. Esse valor *F* constitui a **pressão máxima de vapor** à temperatura da experiência. A pressão máxima de vapor corresponde, portanto, ao equilíbrio **líquido-vapor**, sendo representada, no diagrama de fases, por um ponto da curva de vaporização.

Denominamos **vapor saturante** aquele que se encontra em presença do líquido e, portanto, exercendo a pressão máxima *F* (o ponto *d* da **fig. 12**). Chamamos de **vapor seco** aquele que não se encontra em presença do líquido, exercendo então uma pressão menor que a máxima ($p < F$).

Como conclusão dos fatos observados, podemos estabelecer:

O vapor saturante não obedece à lei de Boyle (pV = constante). A pressão por ele exercida (pressão máxima de vapor *F*) **não depende do volume** ocupado pelo vapor.

A influência da temperatura na pressão máxima de vapor foi bem estabelecida por Thomas Andrews (1813-1886), físico irlandês, quando realizou compressões isotérmicas em diferentes temperaturas para uma mesma substância.

Repetindo a experiência anterior (com o CO_2) em temperaturas sucessivamente mais elevadas (**fig. 13**), verificamos que, **quanto mais elevada for a temperatura, maior a pressão máxima** *F* em que ocorre a condensação. Além disso, o patamar do gráfico $p \times V$ diminui, isto é, com o aumento da pressão, a liquefação torna-se mais rápida. A uma temperatura característica da substância, denominada **temperatura crítica** (θ_C = 31 °C no caso do CO_2), o patamar se reduz a um simples ponto – o **ponto crítico** – e a condensação do vapor é instantânea. A curva obtida ligando-se as extremidades dos patamares (em azul na **fig. 13**) é denominada **curva de saturação**.

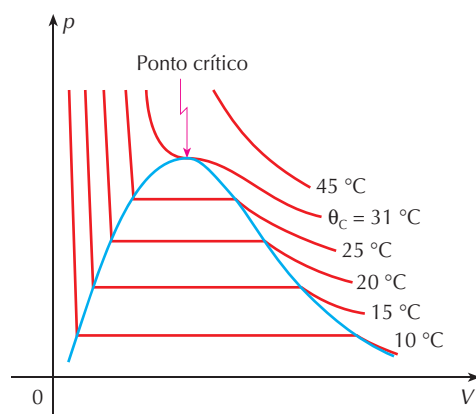



Figura 13. Isotermas de Andrews para o CO_2.

Em conclusão:

A pressão máxima de vapor *F* de uma substância varia exclusivamente em função da temperatura.

O maior valor possível para a pressão máxima de vapor de uma substância é a pressão crítica F_C, correspondente à temperatura crítica.

V2_P1_UN_C_CAP_06.indd 109 22.08.09 09:27:01

Se a compressão isotérmica ocorrer em temperatura superior à temperatura crítica θ_C, verifica-se que não mais ocorre condensação. A substância estará sempre na fase gasosa, obedecendo à lei de Boyle. Acima da temperatura crítica, a substância não é mais chamada de vapor, reservando-se a ela o nome de **gás**. Portanto:

Gás é a substância na fase gasosa numa temperatura superior à temperatura crítica. Um gás não se condensa por compressão isotérmica.

Levando-se em conta que a pressão máxima de vapor corresponde ao equilíbrio líquido-vapor da substância, a curva das pressões máximas de vapor, no diagrama de fases, é a curva de vaporização (**fig. 14**), que se estende do ponto triplo *T* ao ponto crítico *C*.

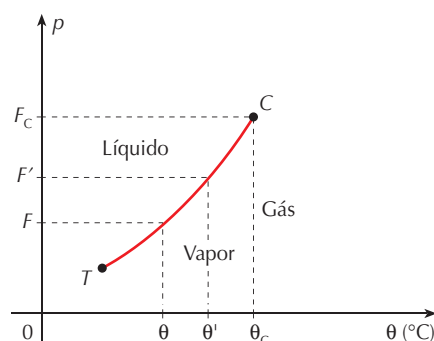



Figura 14. A curva de vaporização é a curva das pressões máximas.

Na tabela seguinte apresentamos os pontos críticos de algumas substâncias.

Substância	Pressão crítica	Temperatura crítica
Água	217,5 atm	374 °C
CO_2	73 atm	31 °C
Oxigênio	49,7 atm	−119 °C
Hélio	2,26 atm	−267,9 °C

Observe que a água na fase gasosa é vapor até 374 °C. Acima dessa temperatura, a água é gás, não podendo ser liquefeita por compressão isotérmica. A substância que apresenta o menor valor de temperatura crítica e o menor valor de pressão crítica é o hélio.

Incluindo agora o ponto crítico, os diagramas de fases do CO_2 e da água assumem os aspectos apresentados na **figura 15**.

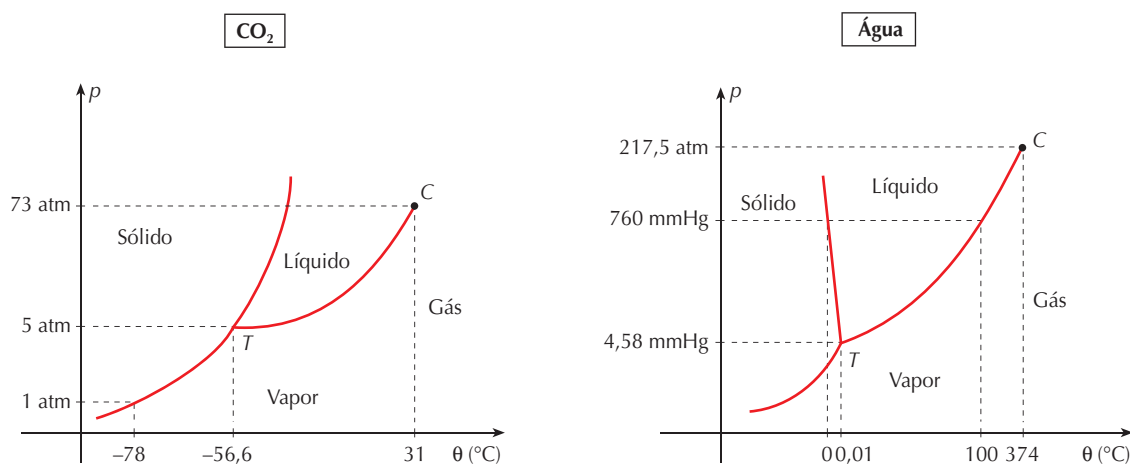



Figura 15. Diagramas de fases do CO_2 e da água (fora de escala), incluindo o ponto crítico *C*.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 37 No interior de um cilindro provido de êmbolo está um líquido volátil (por exemplo, éter) em equilíbrio com seu vapor. A temperatura se mantém constante. Responda:

a) O equilíbrio entre o líquido e o vapor é estático ou dinâmico?

b) Qual é a pressão exercida pelo vapor? Trata-se de vapor seco ou saturante?

c) Que sucede ao sistema se elevarmos o êmbolo sem variarmos a temperatura?

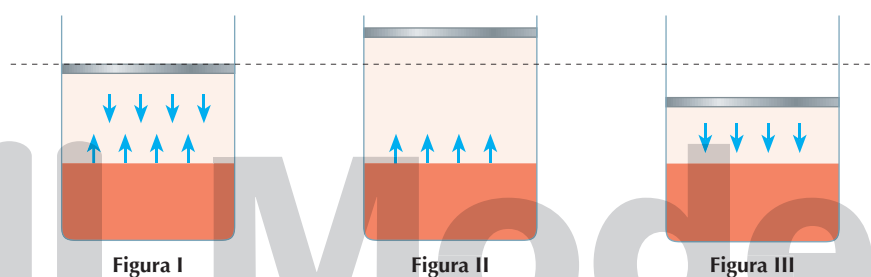
d) Que sucede ao sistema se baixarmos o êmbolo sem variarmos a temperatura?

Solução:

a) O equilíbrio do líquido com o vapor é **dinâmico**. Em dado intervalo de tempo, a quantidade de líquido que se vaporiza é igual, em média, à quantidade de vapor que se condensa. No entanto, para fins práticos, é como se nenhuma molécula migrasse, seja do líquido para o vapor, seja do vapor para o líquido.

b) Havendo equilíbrio entre líquido e vapor, a pressão que o vapor exerce é a **pressão máxima**, tratando-se, portanto, de **vapor saturante**.

c) Se elevarmos o êmbolo (com θ constante), oferecendo maior volume, o **líquido se vaporiza**, pois, enquanto existir líquido e vapor no sistema, a pressão não pode variar, mantendo-se no valor da pressão máxima F.

d) Se baixarmos o êmbolo (com θ constante), oferecendo menor volume, **há condensação de vapor**, de modo que a pressão continua no valor da pressão máxima F enquanto coexistirem vapor e líquido no sistema.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 113 Um cilindro com pistão contém 30 cm³ de vapor seco de certa substância, sob pressão normal. Se o pistão for movimentado, de modo que o vapor continue seco e o volume passe a 75 cm³, qual será a nova pressão do vapor? A temperatura se mantém constante durante o processo.

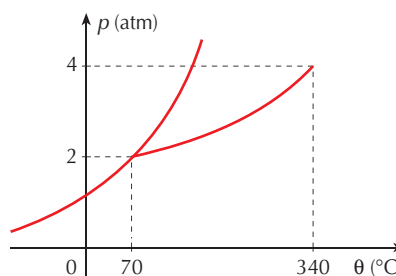
P. 114 Um cilindro de volume variável contém, inicialmente, 20 cm³ de vapor saturante de uma substância a 10 °C, exercendo uma pressão de 15 cmHg. Se o volume for reduzido à metade, sem alteração de temperatura, o que sucede à pressão exercida pelo vapor? Justifique.

P. 115 Considere que o diagrama de fases ao lado pertença a uma substância hipotética denominada **tomito**.

a) Em que fase se apresenta tomito nas condições normais de pressão e temperatura?

b) Se certa massa de vapor de tomito à temperatura de 300 °C for comprimida isotermicamente, que mudança de estado poderá sofrer? Por quê?

c) Localize o ponto triplo e o ponto crítico do tomito, explicando as características desses dois estados.

Seção 6.5

Umidade do ar. Evaporação

Objetivos

- Conhecer os fatores que interferem na velocidade de evaporação de um líquido.
- Compreender como ocorre a evaporação de um líquido.
- Reconhecer a evaporação em fenômenos do dia a dia.

Termos e conceitos

- umidade relativa
- líquidos voláteis
- líquidos fixos

O ar é uma mistura de gases da qual participa o vapor de água, exercendo uma pressão parcial f. Dizemos que o ar está saturado de vapor quando este existe em quantidade tal que esteja exercendo a pressão máxima de vapor F (**fig. 16**). Definimos **umidade relativa** ou **grau higrométrico** H do ar pela relação:

$$H = \frac{f}{F}$$

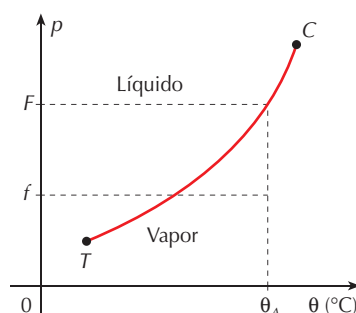



Figura 16. À temperatura ambiente θ_A, a umidade relativa é dada por $H = \frac{f}{F}$.

Frequentemente, a umidade relativa é expressa em porcentagem. Se o ambiente estiver saturado ($f = F$), a umidade relativa vale: $H = 1$ (ou 100%).

A evaporação é a vaporização espontânea de um líquido, sob quaisquer condições, como resultado da agitação térmica molecular. A qualquer temperatura, algumas moléculas do líquido adquirem energia cinética superior à média e conseguem vencer as forças de coesão entre as partículas, abandonando o líquido através da superfície livre.

A velocidade de evaporação v de um líquido (massa que se evapora na unidade de tempo) depende de uma série de fatores:

- **Natureza do líquido**

Nas mesmas condições (temperatura de 20 °C e pressão de 1 atm, por exemplo) há líquidos que se evaporam rapidamente (voláteis) e os que se evaporam lentamente (fixos). São exemplos do primeiro grupo o éter, o álcool, a gasolina, e do segundo grupo, o mercúrio e os óleos. Essa diferença está relacionada com a intensidade das forças de coesão entre as moléculas do líquido.

A gasolina, se deixada exposta, evapora rapidamente, por isso é considerada um líquido volátil. Já os óleos, nas mesmas condições, praticamente não evaporam e por isso são considerados líquidos fixos.

- **Pressão externa**

A pressão externa (p_e) sobre a superfície livre do líquido representa um obstáculo à passagem das moléculas para a fase gasosa. Por isso, quanto maior a pressão externa sobre o líquido, mais lentamente ele evapora.

- **Área da superfície livre**

Quanto maior a área *A* pela qual as moléculas do líquido podem passar para a fase gasosa, maior a velocidade de evaporação. É por isso que a roupa, depois de lavada, deve ser estendida, para que seque mais rapidamente.

- **Temperatura**

Quanto maior a temperatura θ, maior a agitação térmica molecular. Por isso, aumentando-se a temperatura de um líquido, as moléculas passam a se agitar mais intensamente e um maior número delas abandona o líquido num dado intervalo de tempo, aumentando assim a velocidade de evaporação.

- **Umidade**

A passagem de moléculas do líquido para a fase gasosa e a passagem de moléculas de vapor para a fase líquida está constantemente ocorrendo junto à superfície do líquido. É um processo dinâmico. O líquido evapora porque é maior a quantidade de moléculas que passam para a fase gasosa. Entretanto, se a umidade for grande, isto é, a concentração de vapor junto à superfície do líquido for elevada, no balanço geral menos moléculas evaporam, o que representa uma diminuição da velocidade de evaporação.

O químico inglês John Dalton (1766-1844) estabeleceu empiricamente uma fórmula para traduzir essas influências:

$$v = \frac{K \cdot A \cdot (F - f)}{p_e}$$

Nessa fórmula, *K* representa uma constante característica do líquido, alta para os líquidos voláteis e baixa para os líquidos fixos; *A* é a área da superfície livre do líquido; p_e é a pressão externa sobre a superfície; *F* é a pressão máxima de vapor (que depende da temperatura); *f* é a pressão parcial de vapor na atmosfera (que caracteriza o grau de umidade do ambiente).

Como as moléculas que se vaporizam absorvem calor, a evaporação produz o chamado **frio por evaporação**. Há várias situações do dia a dia que podem ser explicadas com base nesse fenômeno, algumas das quais são descritas a seguir.

Um banhista sente mais frio ao sair da água, enquanto seu corpo está molhado, porque a água que fica em sua pele evapora, retirando calor do seu corpo. A água se conserva fresca em potes de barro porque, sendo o barro um material poroso, parte da água o atravessa e evapora, retirando calor da água que permanece dentro do pote.

A termorregulação do corpo humano baseia-se no fato de que o suor, ao evaporar, retira calor do corpo, mantendo constante a temperatura. O maior "calor" que sentimos em ambiente úmido deve-se ao fato de que a velocidade de evaporação é tanto menor quanto mais vapor exista no ar. Por exemplo: após uma rápida chuva, num dia quente, a sensação de calor se acentua, pois aumenta a quantidade de vapor junto à pele, dificultando a evaporação do suor. O vento e as correntes de ar produzidas por ventiladores amenizam essa sensação, por afastarem da pele o ar carregado de vapor.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *A sensação de calor e a umidade*

Seção 6.6

Equilíbrio sólido-vapor. Sublimação

Objetivos

- Compreender como acontece a passagem do estado sólido para o estado de vapor.
- Reconhecer a sublimação em fenômenos do dia a dia.

Termos e conceitos

- cristalização
- gelo-seco

Se um sólido cristalino receber calor sob pressão constante, **inferior à pressão do ponto triplo**, ele sofrerá **sublimação** numa temperatura característica θ_S, que permanecerá constante durante o processo (**fig. 17A**). Se, sob a mesma pressão, o vapor da substância perder calor, ele se transformará em sólido (sublimação ou cristalização) à mesma temperatura em que ocorreu o processo anterior (**fig. 17B**).

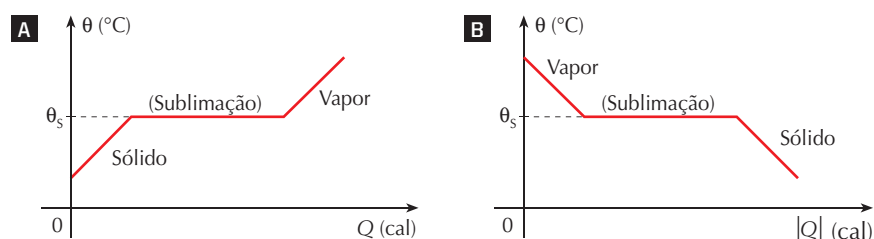



Figura 17. (A) Quando recebe calor, o sólido sublima-se à temperatura θ_S. (B) O vapor, ao perder calor, cristaliza-se à temperatura θ_S.

Qualquer substância (exceto o hélio) pode sublimar, dependendo das condições físicas a que esteja submetida. O iodo e o gelo-seco (CO_2 solidificado), porém, sublimam em condições fáceis de serem reproduzidas. Uma experiência bem simples pode ser realizada com o iodo sob pressão normal (**fig. 18**). Se aquecermos iodo cristalino em um recipiente, verificaremos que ele passa diretamente para a fase de vapor à temperatura de 185,3 °C. Se, acima do recipiente de onde saem os vapores de iodo, colocarmos uma superfície fria, notaremos a formação de cristais de iodo sobre ela, pois os vapores cristalizam-se ao entrar em contato com a superfície e ceder calor para ela.

O gelo-seco tem algumas aplicações práticas importantes. Uma delas é em carrinhos de sorvetes, com a finalidade de manter baixa a temperatura para a conservação do produto. Outra aplicação baseia-se no fato de o gelo-seco sublimar quando colocado em condições ambientes. Em espetáculos teatrais e musicais, um efeito especial interessante consiste em obter-se uma "nuvem de fumaça" mediante a colocação de pedaços de gelo-seco em água. Quando o gelo-seco sublima, os vapores de CO_2 que se formam constituem uma densa neblina, visível devido à presença de gotículas de água, resultantes da condensação do vapor de água do ambiente.

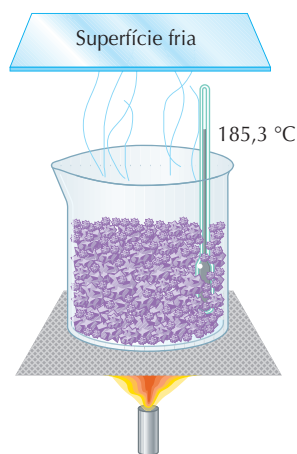



Figura 18. Sublimação e cristalização do iodo.

Gelo-seco (CO_2 sólido) sublimando.

O ciclo da água na natureza

Na natureza, a água está continuamente sofrendo mudanças de fase. A esse processo se dá o nome de **ciclo da água**.

A água líquida dos rios, lagos e mares, além da que provém da transpiração das plantas, evapora-se continuamente sob a ação do calor do Sol. Os vapores formados sobem e condensam-se nas camadas superiores da atmosfera, que são mais frias. As gotículas de água resultantes ficam em suspensão no ar, originando as **nuvens**. Em certas condições, essa água líquida se precipita na forma de chuva, completando então o ciclo.

Em algumas situações, porém, pode haver variações nesse ciclo. O vapor de água existente no ar, por exemplo, pode se condensar sem formar nuvens. Há regiões em que essa condensação, quando cai a temperatura, forma o **nevoeiro** ou **neblina** – que, assim como as nuvens, é constituído por gotículas de água em suspensão no ar. É comum também a formação do **orvalho**, em que os vapores de água se condensam sobre superfícies que estão em temperaturas mais baixas, como as superfícies dos vegetais.

Quando a temperatura cai muito, o estado sólido da água pode fazer parte do ciclo. A **chuva de pedra** ou **granizo**, por exemplo, é constituída por pedaços de gelo provenientes de nuvens submetidas a temperaturas baixas o suficiente para causar a solidificação de gotículas de água. A **neve** é um "nevoeiro sólido", com a formação da água sólida cristalizada no sistema hexagonal (cristalização lenta), originando flocos. A **geada** é uma fina camada de gelo que se forma sobre o solo, as plantas etc., a partir do vapor de água atmosférico, quando a temperatura é muito baixa.

Orvalho

Granizo

Neve

Geada

Nevoeiro ou neblina

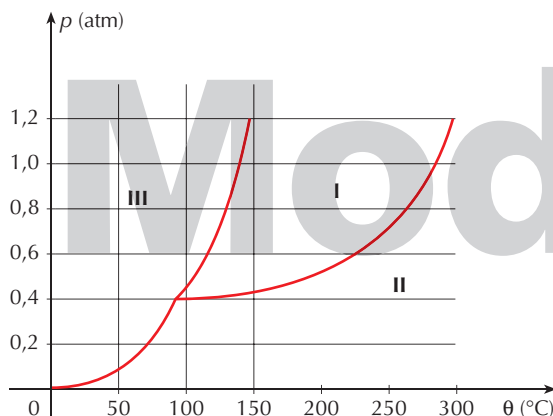
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 116 Num dia em que a temperatura ambiente é 20 °C, a pressão parcial de vapor-d'água na atmosfera é 7,0 mmHg. Sabendo que a pressão máxima de vapor-d'água a 20 °C é igual a 17,5 mmHg, determine a umidade relativa do ar.

P. 117 Calcule quanto diminui a temperatura de 100 g de éter quando evapora 1 g do líquido. O calor latente de vaporização do éter é 80 cal/g, e seu calor específico vale 0,5 cal/g · °C. Admita não haver trocas de calor com o ambiente.

P. 118 Sob pressão normal, o gelo-seco (CO_2 na fase sólida) sublima-se a −78,5 °C. Determine a quantidade de calor necessária para sublimar 50 g de gelo-seco à temperatura de sublimação. O calor latente de sublimação do CO_2 sob pressão normal é 142 cal/g.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 119 (UFMG) A figura mostra o diagrama de fase de uma substância hipotética. Observando o gráfico, responda às questões que se seguem.

a) Associe as regiões I, II e III com as fases sólida, líquida e gasosa dessa substância. Justifique sua resposta.

b) Estime a temperatura de ebulição da substância quando ela se encontra à pressão constante de 0,6 atm. Explique o raciocínio utilizado.

c) Responda se essa substância pode ser sublimada à pressão atmosférica normal. Justifique sua resposta com base nos dados apresentados no gráfico.

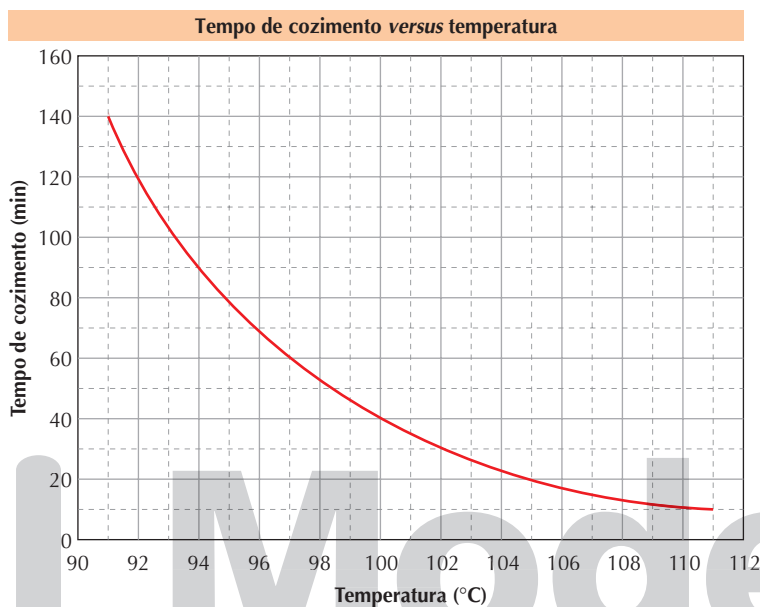
d) Conceitue ponto triplo e estime-o para essa substância.

P. 120 (Unifesp) Os líquidos podem transformar-se em vapor por evaporação ou ebulição. Enquanto a evaporação é um fenômeno espontâneo, restrito à superfície do líquido e que pode ocorrer a temperatura e pressão ambientes, a ebulição ocorre em todo o líquido, sob condições de pressão e temperatura determinadas para cada líquido. Mas ambas as transformações, para se efetivarem, exigem o consumo da mesma quantidade de calor por unidade de massa transformada.

a) Quando as roupas são estendidas nos varais, ou a água no piso molhado de um ambiente é puxada com um rodo, tem-se por objetivo apressar a secagem – transformação da água em vapor – dessas roupas ou do piso. Qual é a causa comum que se busca favorecer nesses procedimentos? Justifique.

b) Avalia-se que a área da superfície da pele de uma pessoa adulta seja, em média, da ordem de 1,0 m². Suponha que, ao sair de uma piscina, uma pessoa retenha junto à pele uma camada de água de espessura média 0,50 mm. Qual é a quantidade de calor que essa camada de água consome para evaporar? Que relação tem esse cálculo com a sensação de frio que sentimos quando estamos molhados, mesmo em dias quentes? Justifique (dados: densidade da água = 1.000 kg/m³; calor latente de vaporização da água = 2.300 kJ/kg).

P. 121 (Unicamp-SP) No Rio de Janeiro (ao nível do mar), uma certa quantidade de feijão demora 40 minutos em água fervente para ficar pronta. A tabela abaixo fornece o valor da temperatura de fervura da água em função da pressão atmosférica, enquanto o gráfico fornece o tempo de cozimento dessa quantidade de feijão em função da temperatura. A pressão atmosférica ao nível do mar vale 760 mmHg e ela diminui 10 mm de mercúrio para cada 100 m de altitude.

Temperatura de fervura da água em função da pressão												
Pressão em mmHg	600	640	680	720	760	800	840	880	920	960	1.000	1.040
Temperatura em °C	94	95	97	98	100	102	103	105	106	108	109	110

a) Se o feijão fosse colocado em uma panela de pressão a 880 mmHg, em quanto tempo ele ficaria pronto?

b) Em uma panela aberta, em quanto tempo o feijão ficará pronto na cidade de Gramado (RS) na altitude de 800 m?

c) Em que altitude o tempo de cozimento do feijão (em uma panela aberta) será o dobro do tempo de cozimento ao nível do mar?

P. 122 (UFF-RJ) Gelo-seco nada mais é que gás carbônico (CO_2) solidificado e sua aplicação vai de efeitos especiais em *shows* à conservação de alimentos. Tal substância é conhecida desde meados do século XIX e recebeu esse nome devido ao fato de não passar pela fusão, quando submetida à pressão atmosférica e à temperatura ambiente, como ocorre com o gelo comum.

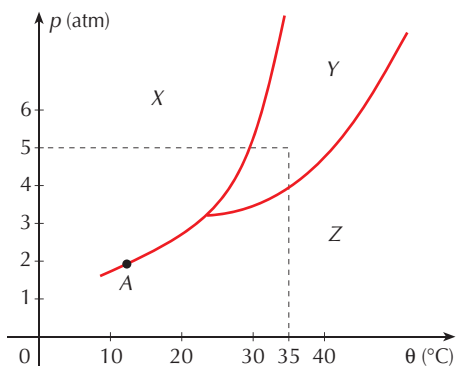
Considere um cubo de 0,10 kg de gelo-seco, a −78 °C, e um bloco de gelo comum de 1,0 kg, a −10 °C, colocados em um recipiente. Desprezando a capacidade térmica do recipiente e a troca de calor com o ambiente:

a) determine a temperatura de equilíbrio térmico;

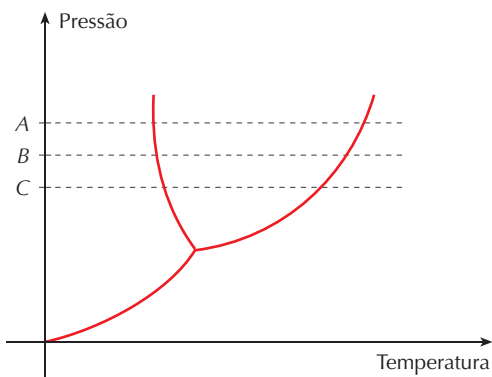
b) descreva os elementos que comporão o sistema no equilíbrio térmico.

(Dados: temperatura de sublimação do gelo-seco = −78 °C; temperatura de fusão do gelo comum = 0 °C; calor latente de vaporização do gelo-seco = 134 cal/g; calor específico do vapor de gelo-seco = 0,20 cal/g · °C; calor específico do gelo comum = 0,50 cal/g · °C)

TESTES PROPOSTOS

T. 102 (Unemat-MT) Dado o diagrama de fases de uma determinada substância abaixo, avalie as afirmações:

01) Na passagem do estado X para Y ocorre a vaporização.
02) Na passagem do estado Y para Z ocorre a fusão.
04) Sob pressão de 5 atm e temperatura de 35 °C, a substância se encontra no estado líquido.
08) Se a substância for expandida isotermicamente, a partir do estado X, ela poderá sofrer sublimação.
16) O ponto A está sobre a curva de sublimação.

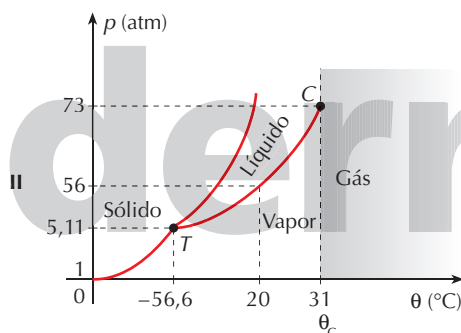
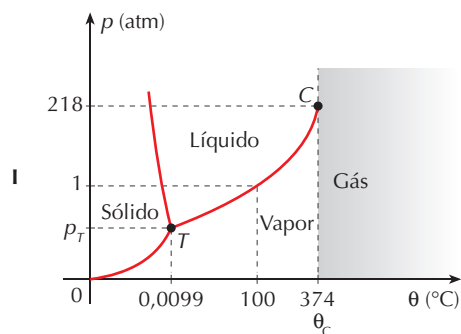
Dê, como resposta, a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

T. 103 (UEL-PR) O gráfico abaixo representa o diagrama de fases da água. A linha A corresponde à pressão na cidade de Paranaguá, no litoral paranaense. A linha B, na cidade de Londrina, e a linha C, no pico Paraná (ponto culminante do estado do Paraná).

Com base nesse gráfico, são feitas as seguintes afirmativas:

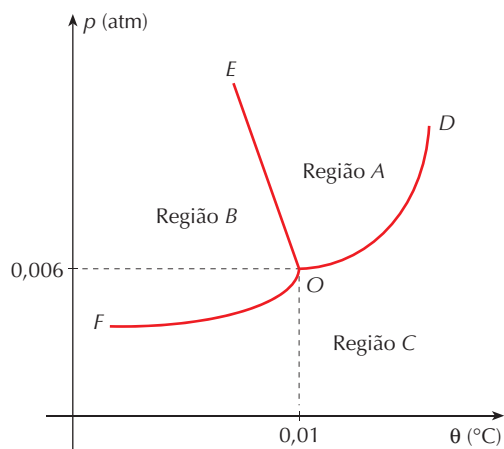
I. Utilizando-se sistemas de aquecimento idênticos, para aquecer massas iguais de água, com as mesmas temperaturas iniciais, até o ponto de vapor, gasta-se mais energia na cidade de Londrina que no pico Paraná.
II. Nas três localidades, o gasto de energia para aquecer quantidades iguais de água, do ponto de gelo até o ponto de vapor, é o mesmo.
III. A temperatura do ponto de gelo em Paranaguá é maior que a temperatura do ponto de gelo em Londrina.

Assinale a alternativa correta.

a) Apenas a afirmativa I é correta.
b) Apenas a afirmativa II é correta.
c) Apenas as afirmativas I e III são corretas.
d) Todas as afirmativas são corretas.
e) Apenas as afirmativas II e III são corretas.

T. 104 (Uespi) Na figura abaixo estão representados os diagramas de estado de duas substâncias puras.

Com base nesses diagramas, a alternativa que apresenta a afirmativa correta é:

a) No diagrama I, se a pressão aumenta, a temperatura de fusão também aumenta.
b) A substância do diagrama II pode ser encontrada na forma líquida acima de 31 °C.
c) A substância do diagrama I não pode ser encontrada no estado de vapor acima de 374 °C.
d) A substância do diagrama II não pode ser encontrada no estado sólido acima de 20 °C.
e) Para a substância do diagrama II, aumento de pressão provoca diminuição da temperatura de fusão.

T. 105 (Unicentro-PR) A liofilização desempenha um papel de grande importância na indústria de alimentos e de medicamentos, conferindo aos produtos uma maior estabilidade. Esta técnica é um processo de secagem por meio da qual a água contida no produto é removida a partir do congelamento do material hidratado, seguido da sua sublimação sob pressão reduzida.
O processo de liofilização está baseado no diagrama de fases da água, a seguir, representado fora de escala.

Com base no diagrama, considere as afirmativas a seguir.

I. Na região A, o produto encontra-se com a água no estado sólido.

II. Em qualquer ponto do trecho *OF*, após um certo tempo, coexistem os estados sólido e vapor.

III. O processo de secagem do produto congelado corresponde à sua passagem direta da região *B* para a região C.

IV. No ponto O, a temperatura de ebulição da água coincide com a temperatura de congelamento.

Estão corretas apenas as afirmativas:

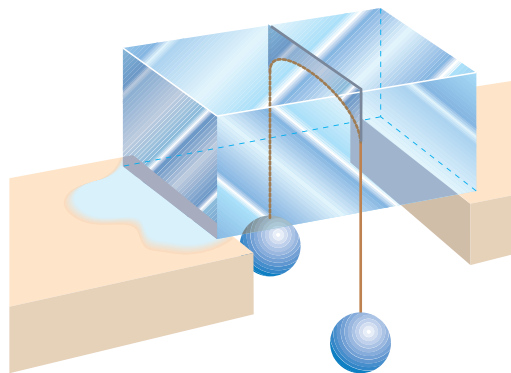
a) I e III.
b) I e IV.
c) II e IV.
d) I, II e III.
e) II, III e IV.

T. 106 (Unifor-CE) Uma substância no estado líquido é resfriada uniforme e constantemente. Ao atingir a temperatura de solidificação, verifica-se a formação de pequenas partículas sólidas que flutuam no líquido. Sobre essa substância é correto afirmar que:

a) aumenta de volume ao se solidificar.
b) diminui de volume ao se solidificar.
c) tem maior densidade no estado sólido que no estado líquido.
d) se solidifica mais rapidamente se aumentar a pressão.
e) a parte que se solidifica apresenta temperatura maior que a parte líquida.

T. 107 (UFF-RJ) Marque a opção que apresenta a afirmativa falsa:

a) Uma substância não existe na fase líquida quando submetida a pressões abaixo daquela de seu ponto triplo.
b) A sublimação de uma substância é possível se esta estiver submetida a pressões mais baixas que a de seu ponto triplo.
c) Uma substância só pode existir na fase líquida se a temperatura a que estiver submetida for mais elevada que sua temperatura crítica.
d) Uma substância não sofre condensação a temperaturas mais elevadas que sua temperatura crítica.
e) Na Lua, um bloco de gelo pode passar diretamente para a fase gasosa.

T. 108 (UFPR) Pode-se atravessar uma barra de gelo usando-se um arame com um peso adequado, conforme a figura, sem que a barra fique dividida em duas partes.

Qual é a explicação para tal fenômeno?

a) A pressão exercida pelo arame sobre o gelo abaixa seu ponto de fusão.
b) O gelo, já cortado pelo arame, devido à baixa temperatura se solidifica novamente.
c) A pressão exercida pelo arame sobre o gelo aumenta seu ponto de fusão, mantendo a barra sempre sólida.
d) O arame, estando naturalmente mais aquecido, funde o gelo; este calor, uma vez perdido para a atmosfera, deixa a barra novamente sólida.
e) Há uma ligeira flexão da barra e as duas partes, já cortadas pelo arame, são comprimidas uma contra a outra, soldando-se.

T. 109 (Fuvest-SP) Nos dias frios, quando uma pessoa expele ar pela boca, forma-se uma espécie de fumaça junto ao rosto. Isso ocorre porque a pessoa:

a) expele o ar quente que condensa o vapor-d'água existente na atmosfera.
b) expele o ar quente e úmido que se esfria, ocorrendo a condensação dos vapores expelidos.
c) expele o ar frio que provoca a condensação do vapor-d'água na atmosfera.
d) provoca a liquefação do ar, com seu calor.
e) provoca a evaporação da água existente na atmosfera.

T. 110 (Unifra-RS) Assinale verdadeiro (V) ou falso (F) e marque a opção com a sequência que julgar correta.

( ) A pressão máxima de vapor de uma substância cresce com a temperatura da substância.

( ) O ponto triplo de uma substância é caracterizado por um par de valores de pressão e temperatura, para os quais coexistem, em equilíbrio, o sólido, o líquido e o vapor da substância.

( ) É possível que a água ferva à temperatura de 70 °C.

A sequência correta é:

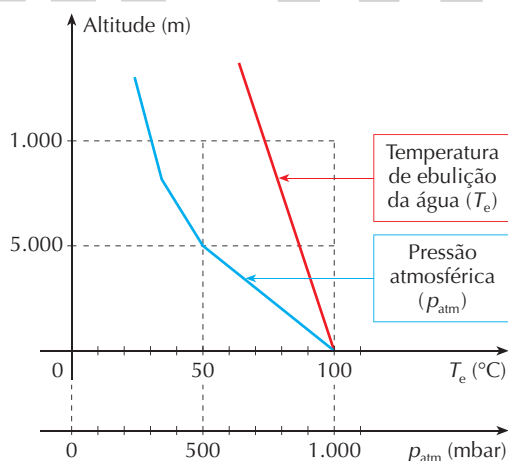
a) V – V – V
b) V – F – V
c) V – F – F
d) F – V – F
e) F – F – V

T. 111 (Mackenzie-SP)

Local	Altitude em relação ao nível do mar (m)
Rio de Janeiro	0
Cidade do México	2.240
São Paulo	750
Monte Everest	8.845

Nos locais acima citados, foram colocadas batatas para cozinhar em panelas abertas idênticas, contendo o mesmo volume de água. É de se esperar que as batatas fiquem cozidas, em menos tempo:

a) no Rio de Janeiro, pois a temperatura de ebulição da água é menor do que nos outros locais.
b) no Monte Everest, pois, quanto maior for a altitude, maior é a temperatura de ebulição da água.
c) em São Paulo, pois, quanto maior for a poluição atmosférica, menor será a temperatura de ebulição da água.
d) na Cidade do México, por estar mais próxima do equador.
e) no Rio de Janeiro, pois, ao nível do mar, a água ferve a uma temperatura mais elevada.

T. 112 (UFRGS-RS) O gráfico representa as variações da pressão atmosférica e da temperatura de ebulição da água, ambas em função da altitude acima do nível do mar.

Considere as afirmações seguintes.

I. Para a temperatura de ebulição da água variar, em função da altitude, na forma indicada no gráfico, é necessário que a água se encontre em um recipiente aberto.
II. Em função da altitude, a pressão atmosférica cai mais rapidamente à metade do valor que possui ao nível do mar do que o ponto de ebulição da água.
III. Qualquer que seja a altitude considerada, a variação percentual da pressão atmosférica é maior do que a correspondente variação percentual do ponto de ebulição da água.

Quais das afirmações se aplicam corretamente a essa situação?

a) Apenas I.
b) Apenas II.
c) Apenas III.
d) Apenas I e II.
e) I, II e III.

T. 113 (Enem-MEC) A panela de pressão permite que os alimentos sejam cozidos em água muito mais rapidamente do que em panelas convencionais. Sua tampa possui uma borracha de vedação que não deixa o vapor escapar, a não ser através de um orifício central sobre o qual assenta um peso que controla a pressão. Quando em uso, desenvolve-se uma pressão elevada no seu interior. Para a sua operação segura, é necessário observar a limpeza do orifício central e a existência de uma válvula de segurança, normalmente situada na tampa.
O esquema da panela de pressão e um diagrama de fases da água são apresentados abaixo.

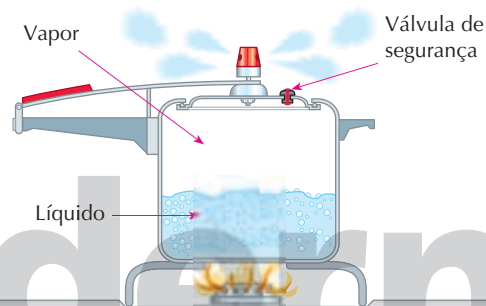
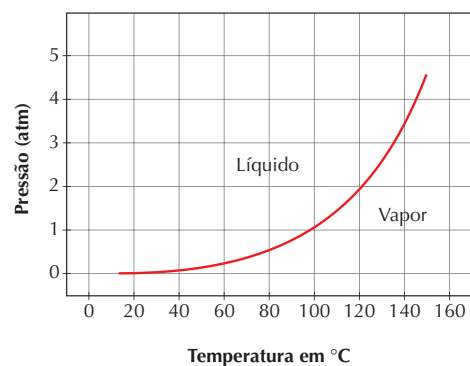



DIAGRAMA DE FASES DA ÁGUA

A vantagem do uso de panela de pressão é a rapidez para o cozimento de alimentos e isto se deve:

a) à pressão no seu interior, que é igual à pressão externa.
b) à temperatura de seu interior, que está acima da temperatura de ebulição da água no local.
c) à quantidade de calor adicional que é transferida à panela.
d) à quantidade de vapor que está sendo liberada pela válvula.
e) à espessura da sua parede, que é maior que a das panelas comuns.

T. 114 (UFC-CE) Ao nível do mar, a água ferve a 100 °C e congela a 0 °C. Assinale a alternativa que indica o ponto de congelamento e o ponto de fervura da água, em Guaramiranga, cidade localizada a cerca de 1.000 m de altitude.

a) A água congela abaixo de 0 °C e ferve acima de 100 °C.

b) A água congela acima de 0 °C e ferve acima de 100 °C.

c) A água congela abaixo de 0 °C e ferve abaixo de 100 °C.

d) A água congela acima de 0 °C e ferve abaixo de 100 °C.

e) A água congela a 0 °C e ferve a 100 °C.

T. 115 Analisando as curvas de Andrews de uma substância, **não** podemos dizer que:

a) na temperatura crítica, o gás sofre liquefação a volume constante.

b) acima da temperatura crítica, nenhum aumento de pressão liquefará o gás.

c) abaixo da curva de saturação, as variações de volume são significativas sob pressão quase constante.

d) em pressões e temperaturas abaixo dos valores críticos, o vapor não pode se liquefazer por compressão isotérmica.

e) uma das alternativas acima é falsa.

T. 116 (UFG-GO) A tabela a seguir contém as temperaturas críticas para algumas substâncias.

Substância	Temperatura crítica (K)
Nitrogênio (N_2)	126
Argônio (Ar)	150
Oxigênio (O_2)	155
Metano (CH_4)	190
Criptônio (Kr)	209

Dessas substâncias, a que pode mudar de estado físico, por compressão, na temperatura de −75 °C, é o:

a) N_2

b) O_2

c) Ar

d) Kr

e) CH_4

T. 117 Nos botijões de gás, o gás no seu interior está liquefeito. Isso nos permite concluir que sua temperatura crítica:

a) é maior que a temperatura ambiente.

b) é menor que a temperatura ambiente.

c) é igual à temperatura ambiente.

d) é maior ou menor que a temperatura ambiente, dependendo da pressão do gás no botijão.

e) é elevadíssima, provavelmente superior a 1.000 °C.

T. 118 (UFBA) Se a temperatura crítica da água é 647 K, pode-se considerar que a água está sob a forma de:

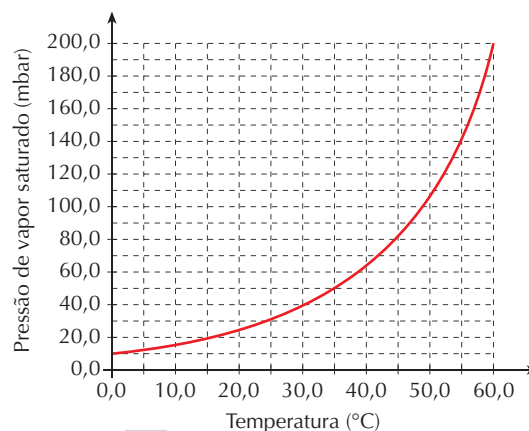
a) vapor, a 500 °C.

b) vapor, acima de 500 °C.

c) gás, a 400 °C.

d) gás, a 273 °C.

e) gás, abaixo de 273 °C.

T. 119 (Unifra-RS) A umidade relativa do ar é a razão entre a pressão do vapor de água local e a pressão do vapor de água saturado à mesma temperatura. O gráfico representa a dependência da pressão de vapor de água saturado com a temperatura.

Considere um local que, na temperatura de 20 °C, apresenta uma pressão do vapor de água igual a 14,0 mbar. A umidade relativa do ar local é em torno de:

a) 5% b) 15% c) 31% d) 57% e) 85%

T. 120 (UFMG) Um ventilador ligado provoca a sensação de frescor nas pessoas, por aumentar a velocidade de evaporação do suor.
A afirmativa que melhor descreve a explicação desse fenômeno é:

a) O ventilador altera o calor específico do ar.

b) O ventilador aumenta a pressão do ar sobre a pele das pessoas.

c) O ventilador diminui a temperatura do ar.

d) O ventilador retira o ar quente e saturado de perto da pele das pessoas.

e) O ventilador diminui a pressão do ar sobre a pele das pessoas.

T. 121 (Cesgranrio-RJ) A sensação de frio que experimentamos quando, num dia ensolarado, saímos da água do mar se deve fundamentalmente:

a) à evaporação da água residual que fica sobre a nossa pele após nos banharmos.

b) ao fato de a temperatura da água do mar ser algo menor do que a temperatura ambiente.

c) ao elevado calor específico da água.

d) à perda do isolamento térmico antes proporcionado pela água quando nela ainda estávamos imersos.

e) à filtragem do calor dos raios solares pela água que ainda molha a nossa pele após sairmos da água.

T. 122 (UEL-PR) Analise a tira a seguir.

Com base na tira e nos seus conhecimentos sobre o tema, considere as afirmativas a seguir.

I. A sensação de secura na língua do personagem se deve à evaporação da água contida na saliva, em função da exposição da língua ao ar por longo tempo.

II. Sob as mesmas condições de temperatura e pressão, a água evapora mais lentamente que um líquido com menor pressão máxima de vapor.

III. Caso o personagem estivesse em um local com temperatura de -10 °C, a água contida na saliva congelaria se exposta ao ar.

IV. Se o personagem tentasse uma nova experiência, derramando acetona na pele, teria uma sensação de frio, como resultado da absorção de energia pelo solvente para a evaporação do mesmo.

Estão corretas apenas as afirmativas:

a) I e II.
b) I e IV.
c) II e III.
d) I, III e IV.
e) II, III e IV.

T. 123 (PUC-RS) Durante o processo de evaporação de um líquido contido numa bacia, ocorre diminuição da temperatura porque:

a) escapam as moléculas com maior energia cinética.
b) escapam as moléculas de maior massa.
c) escapam as moléculas de menor massa.
d) a energia cinética das moléculas não se altera.
e) diminui a massa do líquido.

T. 124 (Enem-MEC) Ainda hoje, é muito comum as pessoas utilizarem vasilhames de barro (moringas ou potes de cerâmica não esmaltada) para conservar água a uma temperatura menor do que a do ambiente. Isso ocorre porque:

a) o barro isola a água do ambiente, mantendo-a sempre a uma temperatura menor que a dele, como se fosse isopor.
b) o barro tem poder de "gelar" a água pela sua composição química. Na reação, a água perde calor.
c) o barro é poroso, permitindo que a água passe através dele. Parte dessa água evapora, tomando calor da moringa e do restante da água, que são assim resfriadas.
d) o barro é poroso, permitindo que a água se deposite na parte de fora da moringa. A água de fora sempre está a uma temperatura maior que a de dentro.
e) a moringa é uma espécie de geladeira natural, liberando substâncias higroscópicas que diminuem naturalmente a temperatura da água.

T. 125 (Vunesp) Nos quadrinhos da tira, a mãe menciona as fases da água conforme a mudança das estações.

ROSE IS ROSE/Pat Brady

Entendendo "boneco de neve" como sendo "boneco de gelo" e que com o termo "evaporou" a mãe se refira à transição água $\rightarrow$ vapor, pode-se supor que ela imaginou a sequência gelo $\rightarrow$ água $\rightarrow$ vapor $\rightarrow$ água. As mudanças de estado que ocorrem nessa sequência são:

a) fusão, sublimação e condensação.
b) fusão, vaporização e condensação.
c) sublimação, vaporização e condensação.
d) condensação, vaporização e fusão.
e) fusão, vaporização e sublimação.

T.126 (Unifesp) Em dias muito quentes e secos, como os do último verão europeu, quando as temperaturas atingiram a marca de 40 °C, nosso corpo utiliza-se da transpiração para transferir para o meio ambiente a energia excedente em nosso corpo. Através desse mecanismo, a temperatura de nosso corpo é regulada e mantida em torno de 37 °C. No processo de transpiração, a água das gotas de suor sofre uma mudança de fase a temperatura constante, na qual passa lentamente da fase líquida para a gasosa, consumindo energia, que é cedida pelo nosso corpo. Se, nesse processo, uma pessoa perde energia a uma razão de 113 J/s, e se o calor latente de vaporização da água é de $2{,}26 \times 10^3$ J/g, a quantidade de água perdida na transpiração pelo corpo dessa pessoa, em 1 hora, é de:

a) 159 g
b) 165 g
c) 180 g
d) 200 g
e) 225 g

T.127 (UFRGS-RS) O CO_2 sólido é denominado gelo-seco por sublimar sob pressão atmosférica, dando origem ao CO_2 gasoso. A sublimação ocorre porque:

a) a pressão correspondente ao ponto triplo do CO_2 é superior a 1 atmosfera.
b) o CO_2 líquido é instável.
c) o CO_2 é um gás de difícil liquefação.
d) a pressão de vapor do CO_2 sólido é inferior a 1 atmosfera.
e) as forças de coesão entre as moléculas de CO_2 são pouco intensas.

T.128 (Enem-MEC) O Sol participa do ciclo da água, pois além de aquecer a superfície da Terra dando origem aos ventos, provoca a evaporação da água dos rios, lagos e mares. O vapor da água, ao se resfriar, condensa em minúsculas gotinhas, que se agrupam formando as nuvens, neblinas ou névoas úmidas. As nuvens podem ser levadas pelos ventos de uma região para outra. Com a condensação e, em seguida, a chuva, a água volta à superfície da Terra, caindo sobre o solo, rios, lagos e mares. Parte dessa água evapora retornando à atmosfera, outra parte escoa superficialmente ou infiltra-se no solo, indo alimentar rios e lagos. Esse processo é chamado de ciclo da água.

Considere, então, as seguintes afirmativas:

I. A evaporação é maior nos continentes, uma vez que o aquecimento ali é maior do que nos oceanos.
II. A vegetação participa do ciclo hidrológico por meio da transpiração.
III. O ciclo hidrológico condiciona processos que ocorrem na litosfera, na atmosfera e na biosfera.
IV. A energia gravitacional movimenta a água dentro do seu ciclo.
V. O ciclo hidrológico é passível de sofrer interferência humana, podendo apresentar desequilíbrios.

Assinale a alternativa correta.

a) Somente a afirmativa III está correta.
b) Somente as afirmativas III e IV estão corretas.
c) Somente as afirmativas I, II e V estão corretas.
d) Somente as afirmativas II, III, IV e V estão corretas.
e) Todas as afirmativas estão corretas.

UNIDADE C

Capítulo 7

Propagação do calor

A propagação do calor pode realizar-se de três diferentes maneiras: condução, convecção e irradiação, estando presente em várias situações práticas. Em uma garrafa térmica, por exemplo, procura-se minimizar as trocas de calor que ocorreriam por meio dos três processos.

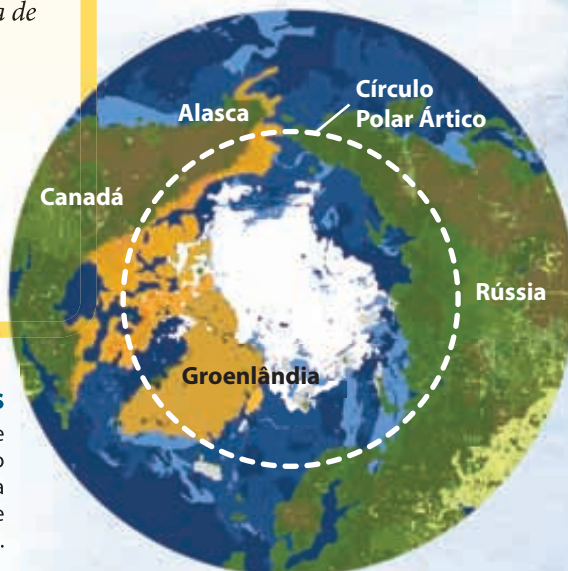
Neve para se aquecer

Polo norte, temperatura abaixo dos 30 °C negativos. O que você faria para se proteger do frio? Construa uma casa de neve! O que parece estranho é uma solução bastante engenhosa. Os iglus são construções esquimós muito antigas que garantiram a sobrevivência desse povo num dos lugares mais inóspitos do planeta.

Para se construir um iglu a neve usada nos blocos deve estar bem dura (para sustentar o peso dos outros blocos).

Hoje em dia não se usam os iglus como moradia, apenas como abrigo em temporadas de caça.

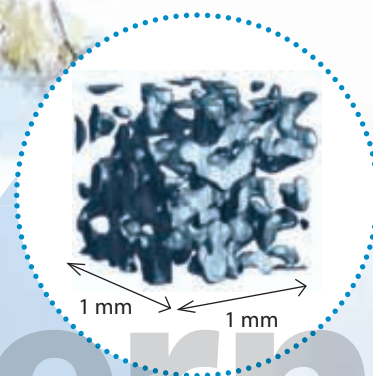
Os inuítes

Os inuítes são um grupo de esquimós que habitam o norte do Canadá, o Alasca e a Groenlândia. É deles o costume de construir iglus.

A fogueira e o calor emanado pelo corpo aquecem o ar, elevando-o junto com a umidade, que congela ao passar pelas frestas entre os blocos, vedando os espaços e reforçando a estrutura.

Isolantes na natureza

A pelagem, densa e de comprimentos variados, dos ursos-polares armazena ar em seu interior e juntamente com uma espessa camada de gordura sob a pele isola o corpo do animal do meio ambiente, protegendo-o do frio.

O revestimento das paredes e dos dormitórios é feito com peles de foca, para que o esquimó não fique em contato direto com a neve.

A gordura também é um ótimo isolante térmico. Os esquimós seguem uma dieta com grandes concentrações de lipídios, para que, assim como os ursos, possam armazenar boa quantidade de gordura sob a pele.

Neve, não gelo!

A neve funciona muito bem como isolante térmico, pois, quando compactada, guarda pequenas bolsas de ar em seu interior, diferentemente do gelo, embora este também seja isolante. Isso faz toda diferença, pois o ar é um ótimo isolante térmico, evitando a transferência de calor por condução.

-3 °C

-30 °C

Para pensar

1. Por que um iglu de gelo não seria tão eficiente quanto um de neve?
2. É comum ouvirmos falar que uma blusa de lã nos esquenta no frio. Essa afirmação está correta? Justifique.

Vale a pena

Dentro do iglu, a temperatura pode chegar a "confortáveis" -3 °C. Considerando que a temperatura externa fica próxima dos -30 °C, dormir dentro de um iglu é uma ótima alternativa.

Seção 7.1

Objetivo

- Conceituar fluxo de calor e conhecer suas unidades de medida.

Termos e conceitos

- quantidade de calor

Fluxo de calor

A propagação do calor pode ocorrer por três processos diferentes: **condução**, **convecção** e **irradiação**. Qualquer que seja o processo, a transmissão do calor obedece à seguinte lei geral:

> *Espontaneamente*, o calor sempre se propaga de um corpo com maior temperatura para um corpo de menor temperatura.

Para os três modos de propagação, definimos a grandeza **fluxo de calor** (Φ).

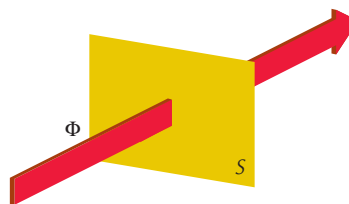



Figura 1. O fluxo Φ de calor através de S é numericamente igual à quantidade de calor transmitida na unidade de tempo.

Seja S uma superfície localizada na região em que ocorre a propagação de calor. O fluxo de calor Φ através da superfície S é dado pela relação entre a quantidade de calor Q que atravessa a superfície e o intervalo de tempo Δt decorrido:

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

As unidades usuais de fluxo de calor são cal/s e kcal/s. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade é o watt (W), que corresponde ao joule por segundo (J/s).

O calor gerado na combustão propaga-se da fogueira ao seu entorno, aquecendo o ambiente e as pessoas próximas.

Seção 7.2

Condução térmica

Objetivos

- Compreender como ocorre o processo de condução térmica.
- Enunciar a lei de Fourier da condução térmica.
- Reconhecer a ocorrência e as aplicações da condução térmica no cotidiano.

Termos e conceitos

- **regime estacionário de condução de calor**
- **coeficiente de condutibilidade térmica**
- **condutor térmico**
- **isolante térmico**

Segure a extremidade *A* de uma barra de ferro *AB* (**fig. 2**) e leve a outra extremidade a uma chama. Após um intervalo de tempo relativamente curto, a extremidade que você segura estará quente, o que requer o uso de uma luva protetora.

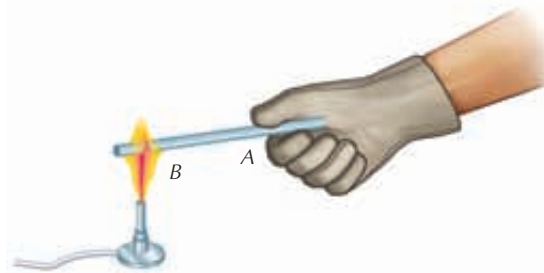
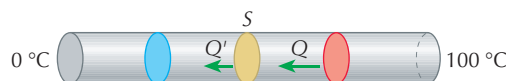



Figura 2. O ferro é bom condutor: o calor se propaga rapidamente da extremidade *B* à extremidade *A*.

O processo pelo qual o calor se propagou da chama para a sua mão é denominado **condução térmica**. O calor é transmitido de uma extremidade a outra por meio da agitação molecular e dos choques entre as moléculas. A rapidez com que a extremidade *A* se apresentou aquecida caracteriza a condição de bom condutor do ferro. Se a experiência descrita fosse realizada com uma barra de vidro, somente depois de muito tempo a extremidade *A* estaria aquecida, pois o vidro é um mau condutor de calor, ou seja, é um isolante térmico.

Para ocorrer a condução, deve existir um meio material. No entanto, é a energia que se propaga; as partes do corpo não se deslocam, havendo apenas transmissão da agitação molecular.

Imaginemos uma barra metálica inicialmente a 20 °C (**fig. 3A**). Uma de suas extremidades é colocada em gelo fundente (0 °C) e a outra em vapor de água em ebulição (100 °C).

A Inicialmente: $Q' < Q$

B Após certo tempo: $Q' = Q$

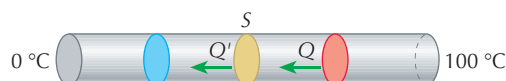



Figura 3. Inicialmente, o regime é variável ($Q' < Q$). Após certo tempo, o regime torna-se estacionário ($Q' = Q$).

Inicialmente, a quantidade de calor Q recebida por um elemento S da barra é maior que a quantidade Q' cedida para o elemento seguinte. A diferença $Q - Q'$ é utilizada no aquecimento do elemento S. Nessas condições, dizemos que o regime de condução é variável, pois a temperatura dos elementos da barra varia à medida que o calor é conduzido.

A partir de certo instante, a temperatura do elemento S da barra não mais varia: a quantidade de calor Q recebida pelo elemento S é igual à quantidade de calor Q' cedida ao elemento seguinte (**fig. 3B**). O regime de condução torna-se então estacionário e a temperatura dos elementos da barra não varia no decorrer do tempo.

Na prática, o regime estacionário de condução pode ser obtido com a barra envolvida por um isolante em sua superfície lateral (**fig. 4**), a fim de se evitar a transmissão de calor para o meio ambiente.

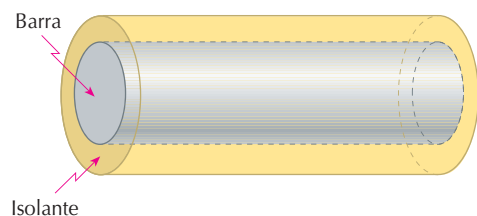



Figura 4. **Para se obter o regime estacionário, a barra é isolada lateralmente.**

Assim, se a barra tem uma extremidade em contato com um recipiente no qual circula vapor de água em ebulição, a 100 °C, e a outra extremidade em contato com um recipiente contendo gelo em fusão, a 0 °C (**fig. 5**), após certo tempo se estabelece o regime estacionário de condução. Quando isso acontece, verifica-se que, de um extremo a outro da barra, há uma distribuição uniforme de temperatura, como indica o gráfico da **figura 5**.

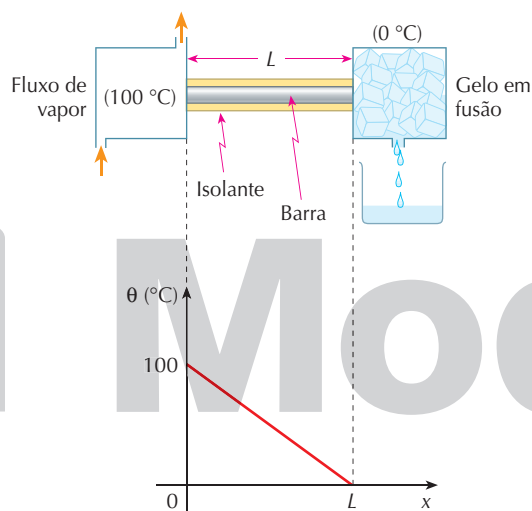



Figura 5. **No regime estacionário, a temperatura varia de um extremo a outro, uniformemente, como indica o gráfico.**

1 Lei da condução térmica

Considere dois ambientes a temperaturas θ_1 e θ_2 tais que $\theta_2 > \theta_1$, separados por uma parede de área *A* e espessura *e* (**fig. 6**).

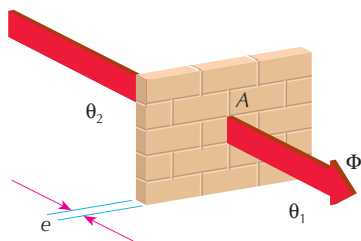



Figura 6. **O fluxo de calor Φ é diretamente proporcional à área *A* e à diferença de temperatura $\Delta\theta$, e inversamente proporcional à espessura *e*.**

Terapia de relaxamento com pedras quentes. As pedras, com maior temperatura que o corpo humano, geram um fluxo de calor no sentido das pedras para o corpo do paciente.

Em regime estacionário, o fluxo de calor Φ (quantidade de calor que atravessa uma superfície pelo intervalo de tempo) depende da área *A* da parede, da espessura *e*, da diferença de temperatura $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ e da natureza do material que constitui a parede.

Verifica-se experimentalmente que, para um dado material, o fluxo de calor é tanto maior quanto maior a área *A*, quanto maior a diferença de temperatura $\Delta\theta$ e quanto menor a espessura *e*.

Em regime estacionário, o fluxo de calor por condução num material homogêneo é diretamente proporcional à área da seção transversal atravessada e à diferença de temperatura entre os extremos, e inversamente proporcional à espessura da camada considerada.

Esse enunciado é conhecido como **lei de Fourier***, expressa pela fórmula:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{e}$$

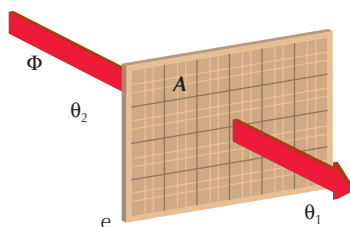
A constante de proporcionalidade *K* depende da natureza do material, sendo denominada **coeficiente de condutibilidade térmica**. Seu valor é elevado para os bons condutores de calor (condutores térmicos), como os metais, e baixo para os isolantes térmicos. Exemplos:

Prata	0,99 cal/s · cm · °C
Alumínio	0,50 cal/s · cm · °C
Ferro	0,16 cal/s · cm · °C

Água	0,0014 cal/s · cm · °C
Lã	0,000086 cal/s · cm · °C
Ar seco	0,000061 cal/s · cm · °C

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 38 Quantas calorias são transmitidas por metro quadrado de um cobertor de 2,5 cm de espessura, durante uma hora, estando a pele a 33 °C e o ambiente a 0 °C? O coeficiente de condutibilidade térmica do cobertor é 0,00008 cal/s · cm · °C.

Solução:

Temos: $K = 0{,}00008$ cal/s · cm · °C; $A = 1\ m^2 = 10^4\ cm^2$; $\theta_2 - \theta_1 = 33$ °C; $e = 2{,}5$ cm

Admitindo ser estacionário o regime de condução, o fluxo de calor Φ vale:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{e} = \frac{0{,}00008 \cdot 10^4 \cdot 33}{2{,}5} \Rightarrow \Phi = 10{,}56 \text{ cal/s}$$

De $\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$, vem: $Q = \Phi \cdot \Delta t$

Mas: $\Delta t = 1$ h $= 3.600$ s

Portanto: $Q = 10{,}56 \cdot 3.600 \Rightarrow \boxed{Q = 38.016 \text{ cal}}$

Resposta: 38.016 cal

* **FOURIER**, Jean Baptiste Joseph (1768-1830), físico e matemático francês, viveu na época de Napoleão, para quem trabalhou na França e no Egito. Ao estudar a propagação de calor em corpos sólidos, desenvolveu um recurso matemático importante (as séries de Fourier), que facilita a descrição de funções complicadas.

R. 39 Uma barra de alumínio ($K = 0{,}5$ cal/s · cm · °C) está em contato, numa extremidade, com gelo em fusão e, na outra, com vapor de água em ebulição sob pressão normal. Seu comprimento é 25 cm, e a seção transversal tem 5 cm² de área. Sendo a barra isolada lateralmente e dados os calores latentes de fusão do gelo e de vaporização da água ($L_F = 80$ cal/g; $L_V = 540$ cal/g), determine:

a) a massa do gelo que se funde em meia hora;

b) a massa de vapor que se condensa no mesmo tempo;

c) a temperatura numa seção da barra a 5 cm da extremidade fria.

Solução:

Dados: $e = 25$ cm; $A = 5$ cm²; $K = 0{,}5$ cal/s · cm · °C

O fluxo de calor que atravessa a barra é igual a:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{e} = \frac{0{,}5 \cdot 5 \cdot (100 - 0)}{25} \Rightarrow \Phi = 10 \text{ cal/s}$$

Em meia hora, isto é, em $\Delta t = 1.800$ s, a quantidade de calor recebida pelo gelo e perdida pelo vapor será:

$$Q = \Phi \cdot \Delta t \Rightarrow Q = 10 \cdot 1.800 \Rightarrow Q = 18.000 \text{ cal}$$

a) Recebendo essa quantidade de calor, o gelo sofre fusão. A massa que se funde será dada por:

$$Q = m \cdot L_F \Rightarrow m = \frac{Q}{L_F}$$

Como $L_F = 80$ cal/g, vem:

$$m = \frac{18.000}{80} \Rightarrow \boxed{m = 225 \text{ g}}$$

b) Perdendo essa quantidade de calor ($Q' = -18.000$ cal) e sendo o calor latente de condensação do vapor $L_C = -540$ cal/g, a massa de vapor que se condensa será dada por:

$$Q' = m' \cdot L_C \Rightarrow m' = \frac{Q'}{L_C} \Rightarrow m' = \frac{-18.000}{-540} \Rightarrow \boxed{m' \simeq 33{,}3 \text{ g}}$$

c) Em relação à extremidade quente:

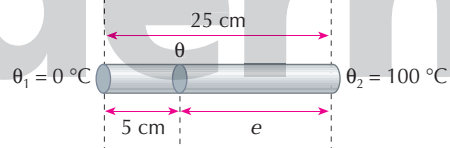
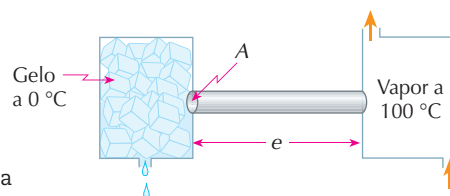
$$e = 25 - 5 \Rightarrow e = 20 \text{ cm}$$

Sabe-se ainda que:

$\Phi = 10$ cal/s; $A = 5$ cm²; $K = 0{,}5$ cal/s · cm · °C

Na fórmula do fluxo de calor:

$$\Phi = \frac{K \cdot A \cdot (\theta_2 - \theta)}{e} \Rightarrow 10 = \frac{0{,}5 \cdot 5 \cdot (100 - \theta)}{20} \Rightarrow \boxed{\theta = 20 \text{ °C}}$$

Respostas: a) 225 g; b) ≃33,3 g; c) 20 °C

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 123 Uma placa é atravessada por uma quantidade de calor igual a $3{,}0 \cdot 10^3$ cal em um intervalo de tempo de 5 minutos. Determine o fluxo de calor através dessa placa expressa em cal/s e em watt. Considere 1 cal = 4 J.

P. 124 (IME-RJ) Um vidro plano, com coeficiente de condutibilidade térmica 0,00183 cal/s · cm · °C, tem uma área de 1.000 cm² e espessura de 3,66 mm. Sendo o fluxo de calor por condução através do vidro de 2.000 cal/s, calcule a diferença de temperatura entre suas faces.

P. 125 Uma das extremidades de uma barra de cobre, com 100 cm de comprimento e 5 cm² de seção transversal, está situada num banho de vapor-d'água sob pressão normal, e a outra extremidade, numa mistura de gelo fundente e água. Despreze as perdas de calor pela superfície lateral da barra. Sendo 0,92 cal/s · cm · °C o coeficiente de condutibilidade térmica do cobre, determine:

a) o fluxo de calor através da barra;

b) a temperatura numa seção da barra situada a 20 cm da extremidade fria.

P.126 Um recipiente consta de duas partes separadas por uma placa de zinco ($K = 0,3$ cal/s · cm · °C) com 10 mm de espessura, 20 cm de altura e 40 cm de largura. Num dos compartimentos há gelo a 0 °C e, através do outro, passa continuamente vapor de água a 100 °C. Sendo 80 cal/g o calor latente de fusão do gelo, determine a massa de gelo que se derrete em cada minuto.

P.127 Uma barra de prata tem seção de 1 cm^2 e 50 cm de comprimento. Uma de suas extremidades está em contato com água fervendo, sob pressão normal, e a outra é envolvida por uma "camisa" refrigerada por água corrente, que entra a 10 °C na camisa. Sendo o coeficiente de condutibilidade térmica da prata 1,00 cal/cm · s · °C e supondo que em 6 min passem 200 g de água pela camisa, calcule o aumento de temperatura experimentado por esse líquido.

2 Aplicações da condução térmica

O isolamento térmico é uma importante aplicação relacionada com a condução. Assim, utilizam-se materiais isolantes térmicos para minimizar a transferência de calor entre corpos a diferentes temperaturas. É o que acontece nas geladeiras de isopor, nos agasalhos feitos de material isolante, nas paredes de fogões e refrigeradores, isolados do exterior por materiais como lã de vidro e poliuretano, e nos cabos de panelas.

A panela deve ter cabo isolante para possibilitar seu manuseio pelo cozinheiro.

As caixas de isopor são largamente utilizadas para manter a temperatura dos objetos em seu interior.

Outra aplicação interessante do fenômeno da condução térmica é o uso de telas metálicas. Sabemos que, colocando-se um recipiente de vidro comum diretamente numa chama (**fig. 7A**), ele se rompe, pois a região diretamente aquecida se dilata mais que as regiões vizinhas. No entanto, interpondo-se uma tela metálica entre a chama e o recipiente, a ruptura não acontece (**fig. 7B**). Sendo boa condutora, a tela transmite rapidamente o calor para todos os pontos de sua própria extensão, garantindo um aquecimento uniforme para o recipiente.

Note, na foto abaixo, que a chama não ultrapassa a tela, em virtude de o calor se distribuir em toda a sua extensão. Assim, os gases não queimam na região logo acima da tela, pois ali a temperatura não alcança valores suficientemente elevados.

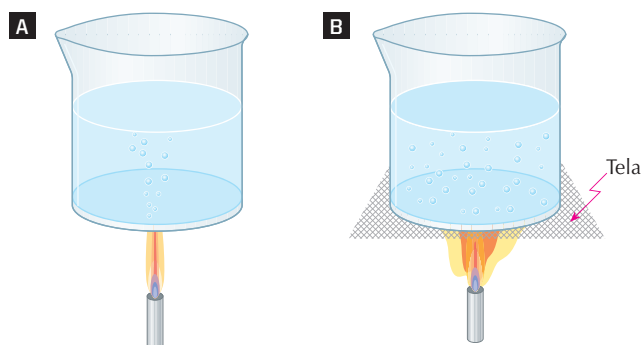



Figura 7. A tela metálica distribui uniformemente o calor pela base do recipiente.

A tela retém a chama.

No mesmo princípio se baseia a lâmpada de segurança dos mineiros ou lâmpada de Davy, esquematizada na **figura 8**, na qual uma pequena chama fica envolvida por uma tela metálica. Nas minas de carvão, essa lâmpada é usada para detectar a presença do explosivo gás **grisu** (metano). O contato desse gás com a chama da lâmpada produz uma pequena explosão, que apaga a chama. O calor liberado na queima não faz explodir o restante do gás grisu, pois esse calor se distribui pela extensão da tela. A pequena explosão e o fato de a chama se apagar são sinais de alerta.

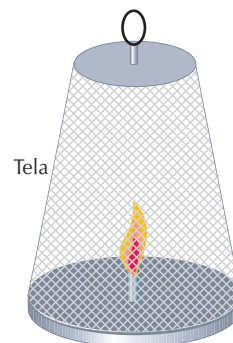



Figura 8. Lâmpada de Davy.

A condução do calor no dia a dia

A preocupação com a condução do calor está presente em várias situações práticas:

1. Os esquimós fazem suas casas, os iglus, com blocos de neve compactada, porque o gelo é um excelente isolante térmico, mantendo o ambiente interno mais quente que o externo.
2. As roupas de lã dos beduínos do deserto isolam seu corpo, de modo a minimizar as trocas de calor do ambiente para o corpo, durante o dia, e do corpo para o ambiente, à noite.
3. Periodicamente, nas geladeiras mais antigas, o gelo que se forma sobre o congelador deve ser removido para não prejudicar as trocas de calor com o interior da geladeira.
4. No inverno, os pássaros costumam eriçar suas penas para acumular ar entre elas. Sendo isolante térmico, o ar diminui as perdas de calor para o ambiente.

Um esquimó construindo seu iglu.

Ave com penas eriçadas.

Beduíno coberto com roupas de lã em um deserto.

Seção 7.3

Convecção térmica

Objetivos

- Compreender como ocorre o processo de convecção térmica.
- Reconhecer a ocorrência e as consequências da convecção térmica.

Termos e conceitos

- correntes de convecção
- brisa marítima
- brisa terrestre
- inversão térmica

A convecção consiste no transporte de energia térmica de uma região para outra por meio do **transporte de matéria**, o que só pode ocorrer nos fluidos (líquidos e gases).

A movimentação das diferentes partes do fluido ocorre pela diferença de densidade que surge em virtude do seu aquecimento ou resfriamento. Na **figura 9** está representado um líquido sendo aquecido em sua parte inferior. As porções mais quentes das regiões inferiores, tendo sua densidade diminuída, sobem. As porções mais frias da região superior, tendo maior densidade, descem. Colocando-se serragem no líquido, é possível visualizar as correntes líquidas ascendentes quentes e descendentes frias. Essas correntes líquidas são denominadas **correntes de convecção**.

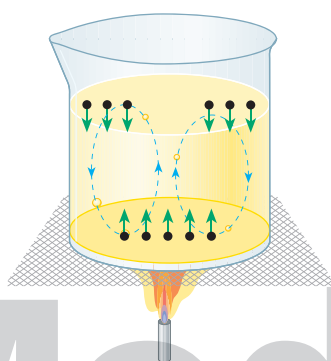



Figura 9. Correntes de convecção num líquido em aquecimento.

Citamos, a seguir, algumas aplicações e consequências da convecção térmica.

- Na retirada de gases pelas chaminés, os gases aquecidos, resultantes da combustão, têm densidade diminuída e sobem, sendo eliminados. Ao redor da chama, cria-se uma região de baixa pressão que "aspira" o ar externo, mantendo a combustão.
- Devido a diferenças de temperatura em diferentes pontos da atmosfera, estabelecem-se correntes de convecção ascendentes, de ar quente, e descendentes, de ar frio. Planadores, asas-delta e outros veículos não motorizados movimentam-se no ar graças a essas correntes. O veículo somente ganha altitude quando alcança uma corrente quente ascendente, pois em voo planado está sempre descendo.

Para permitir a convecção térmica, o congelador da geladeira deve estar na parte superior (1), mas o aquecedor de um ambiente deve ser colocado no solo (2).

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *O gelo que não derrete*

- Nos radiadores de automóveis, a água quente aquecida pelo motor, sendo menos densa, sobe e a água mais fria da parte superior desce. Para melhor eficiência, a convecção pode ser forçada por uma bomba-d'água.
- Quando um ambiente é resfriado, esse resfriamento é feito a partir da região superior, porque o fluido frio tende a descer. Assim: o congelador das geladeiras de uma porta só é colocado na parte superior; o ar-condicionado de uma sala de cinema é localizado no teto; ao resfriar-se um barril de chope, o gelo é colocado sobre o barril.
- A água, tendo alto calor específico, sofre variações de temperatura relativamente pequenas. Desse modo, numa região litorânea, a terra se aquece mais do que o mar durante o dia. O ar aquecido, em contato com a terra, sobe e produz uma região de baixa pressão, aspirando o ar que está sobre o mar. Sopra a brisa marítima (**fig. 10A**). À noite, ao perder calor, a terra se resfria mais do que o mar. O processo se inverte e sopra a brisa terrestre (**fig. 10B**).

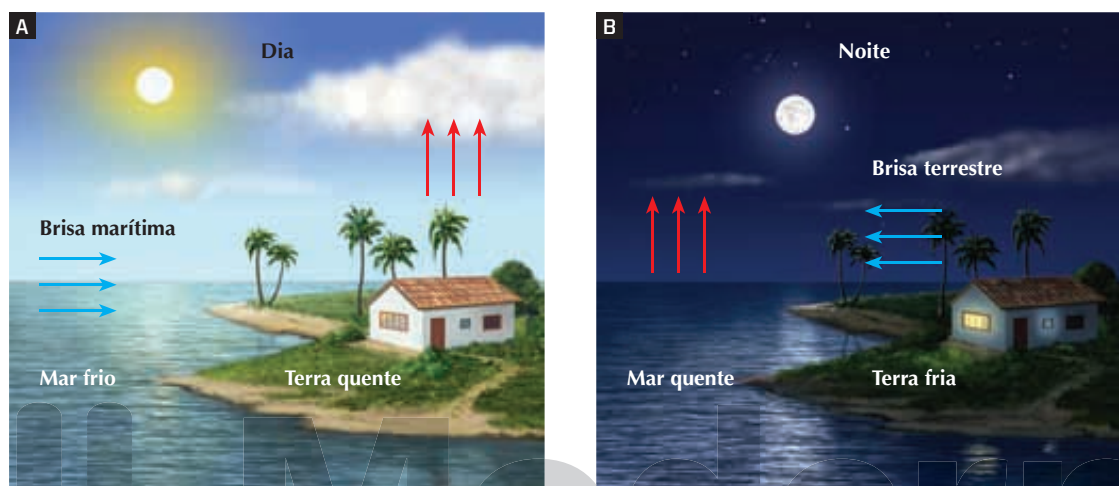



Figura 10. **Durante o dia, sopra a brisa marítima e, à noite, sopra a brisa terrestre.**

Nas grandes cidades, a convecção é um fenômeno muito importante para a dispersão dos poluentes atmosféricos. Estando os gases eliminados pelos veículos automotores e pelas indústrias mais quentes que o ar das camadas superiores, eles sobem e se diluem na atmosfera. No inverno, entretanto, é comum o ar poluído próximo ao solo estar mais frio que o ar puro das regiões mais elevadas. Desse modo, deixa de ocorrer a convecção, aumentando a concentração dos poluentes no ar que a população respira, com graves consequências, sobretudo para crianças e pessoas idosas ou doentes. Essa ocorrência recebe o nome de **inversão térmica** e pode ser agravada na ausência de ventos e de chuva.

A cidade de São Paulo, em uma manhã de inversão térmica, vista da Serra da Cantareira.

Seção 7.4

Noções de irradiação térmica

Objetivos

- Compreender como ocorre o processo de irradiação.
- Conceituar absorvidade, refletividade e transmissividade.
- Enunciar a lei dos intercâmbios.
- Conceituar corpo negro e poder emissivo de um corpo.
- Enunciar e aplicar a lei de Stefan-Boltzman e a lei de Kirchhoff.
- Reconhecer a ocorrência da irradiação térmica em fenômenos cotidianos.

Termos e conceitos

- espelho ideal
- emissividade
- efeito estufa
- termografia

A transmissão de energia por meio de ondas eletromagnéticas (ondas de rádio, luz visível e raios ultravioleta, entre outras) é denominada **irradiação** ou **radiação**. Quando essas ondas são os raios infravermelhos, falamos em **irradiação térmica**.

Ao contrário da condução térmica e da convecção térmica, a irradiação ocorre sem a necessidade de um meio material: o transporte é exclusivamente de energia, sob a forma de ondas.

Por exemplo, quando colocamos a mão embaixo de uma lâmpada acesa, sem tocá-la, temos a sensação de calor. Como o ar é mau condutor térmico, praticamente não ocorre condução. Também não há convecção porque o ar quente sobe. Então, o calor que nos atinge só pode ser originado de ondas que se propagam da lâmpada para nossa mão. Outro exemplo é o caso da energia que recebemos do Sol, que só pode nos atingir por irradiação, posto que no vácuo não existe meio material.

Quando a energia radiante incide na superfície de um corpo, ela é parcialmente absorvida, parcialmente refletida e parcialmente transmitida através do corpo. A parcela absorvida aumenta a energia de agitação das moléculas constituintes do corpo (energia térmica). Na **figura 11**, da quantidade total de energia Q_i incidente, é absorvida a parcela Q_a, reflete-se a parcela Q_r e é transmitida a parcela Q_t, de modo que:

$$Q_i = Q_a + Q_r + Q_t$$

Para avaliar a proporção da energia incidente que sofre os fenômenos de absorção, reflexão e transmissão, definimos as seguintes grandezas adimensionais:

Absorvidade

$$a = \frac{Q_a}{Q_i}$$

Refletividade

$$r = \frac{Q_r}{Q_i}$$

Transmissividade

$$t = \frac{Q_t}{Q_i}$$

Somando as três grandezas, obtemos:

$$a + r + t = \frac{Q_a}{Q_i} + \frac{Q_r}{Q_i} + \frac{Q_t}{Q_i} \Rightarrow$$

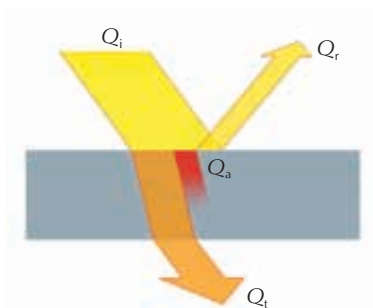
$$\Rightarrow a + r + t = \frac{Q_a + Q_r + Q_t}{Q_i} = \frac{Q_i}{Q_i} \Rightarrow \boxed{a + r + t = 1}$$

Figura 11.

Assim, por exemplo, um corpo ter absorvidade $a = 0{,}8$ significa que 80% da energia nele incidente foi absorvida. Os restantes 20% da energia total devem se dividir entre reflexão e transmissão.

Quando não há transmissão de energia radiante através do corpo, a transmissividade é nula ($t = 0$). Nesse caso:

$$a + r = 1$$

V2_P1_UN_C_CAP_07.indd 135 22.08.09 09:02:49

As grandezas a, r e t podem ainda ser denominadas, respectivamente, **poder absorvedor**, **poder refletor** e **poder transmissor**.

Por definição, **corpo negro** é um corpo ideal que absorve toda a energia radiante nele incidente. Decorre daí que sua absorvidade é $a = 1$ (100%) e sua refletividade é nula ($r = 0$). O **espelho ideal** é um corpo que reflete totalmente a energia radiante que nele incide, tendo absorvidade nula ($a = 0$) e refletividade $r = 1$ (100%).

Corpo negro $a = 1$ $r = 0$

Espelho ideal $a = 0$ $r = 1$

Quando vários corpos a diferentes temperaturas são colocados num recinto termicamente isolado do exterior, ao fim de algum tempo todos estarão à mesma temperatura. No entanto, todos os corpos **continuam a irradiar energia**. Estabelece-se um equilíbrio dinâmico que pode ser expresso na forma da **lei dos intercâmbios**, enunciada, em 1792, pelo físico suíço Pierre Prévost*:

> Todos os objetos estão irradiando energia continuamente. No equilíbrio térmico, a potência irradiada ou emitida por um objeto é igual à potência que ele absorve, na forma de radiação, dos objetos vizinhos.

Está claro que, em um ambiente isolado, se houver um corpo polido e um corpo escuro, o corpo polido absorverá pouca energia, emitindo portanto pouca energia, pois a maior parte é refletida. O corpo escuro, por sua vez, absorverá grande quantidade de energia e, em consequência, emitirá também grande quantidade de energia. E o equilíbrio térmico entre eles será mantido.

Dessa forma, todo corpo bom absorvedor é bom emissor e todo corpo bom refletor é mau emissor. O **corpo negro**, sendo o absorvedor ideal, é também o **emissor ideal** ou **perfeito**.

Na prática há corpos que apresentam absorvidades quase unitárias, como a fuligem ($a = 0,94$), que é excelente absorvedora e excelente emissora. Outros apresentam absorvidades quase nulas, sendo maus absorvedores e maus emissores, como a prata polida ($a = 0,02$).

De modo geral, os corpos escuros apresentam absorvidade elevada e refletividade baixa, sendo bons absorvedores e emissores. Ao contrário, os corpos claros e polidos são maus absorvedores e emissores, pois possuem baixa absorvidade e elevada refletividade.

Nas regiões de clima muito quente, as roupas devem ser claras, a fim de refletir a energia incidente. É o que ocorre em certas regiões do deserto onde os beduínos usam largas túnicas claras. Porém, em outras regiões, as túnicas usadas são negras. Mas as roupas escuras não aquecem mais que as roupas claras? De fato, elas atingem uma temperatura maior (cerca de 6 °C); entretanto, o maior aquecimento provoca, em relação à túnica branca, maior corrente de convecção do ar, sob a roupa do beduíno. O ar externo entra pela abertura inferior da túnica e sai pela parte superior, favorecendo a evaporação do suor, ajudando o organismo a regular a temperatura.

O carvão em brasa emite radiação luminosa como consequência de sua alta temperatura.

* **PRÉVOST**, Pierre (1751-1839), físico e filósofo suíço. Na Física, além de seus estudos referentes ao calor, trabalhou questões ligadas ao magnetismo.

V2_P1_UN_C_CAP_07.indd 136 22.08.09 09:02:50

Radiômetro de Crookes

O dispositivo denominado radiômetro de Crookes*, esquematizado na figura ao lado, é constituído de uma série de palhetas, polidas de um lado e enegrecidas do outro, colocadas numa ampola com gás rarefeito. Quando incide energia radiante no sistema, as palhetas giram no sentido indicado, porque a face enegrecida, absorvendo mais energia, aquece mais o gás ao redor. As moléculas, com maior agitação do lado enegrecido, impulsionam a palheta.

Radiômetro de Crookes.

1 Lei de Stefan-Boltzmann. Lei de Kirchhoff

Poder emissivo (E) de um corpo é a potência irradiada (emitida) por unidade de área, sendo expressa por:

$$E = \frac{P}{A}$$ Unidades usuais: W/m^2; $cal/s \cdot cm^2$

O poder emissivo de um corpo depende da sua natureza e da temperatura em que se encontra. Para cada temperatura, o maior poder emissivo é o do corpo negro, sendo seu valor estabelecido pela **lei de Stefan****-**Boltzmann*****:

O poder emissivo do corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta.

$$E_{CN} = \sigma \cdot T^4$$

A constante de proporcionalidade σ (constante de Stefan-Boltzmann) vale, em unidades do Sistema Internacional:

$$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Assim, se tivermos um corpo negro a 1.000 K, seu poder emissivo será:

$$E_{CN} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot (1.000)^4 \Rightarrow E_{CN} = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{12} \Rightarrow E_{CN} = 5{,}67 \cdot 10^{4}\ W/m^2$$

É comum compararmos o poder emissivo E de um corpo qualquer com o do corpo negro E_{CN}, por meio de uma grandeza denominada **emissividade** (e):

$$e = \frac{E}{E_{cn}}$$

Evidentemente, o corpo negro apresenta emissividade unitária, ou seja:

$$e_{CN} = 1$$

Para um corpo qualquer, a lei de Stefan-Boltzmann pode ser escrita algebricamente desta maneira:

$$E = e \cdot \sigma \cdot T^4$$

* **CROOKES**, William (1832-1919), físico e químico inglês, foi sagrado cavaleiro em 1897. Notabilizou-se pelo estudo das descargas elétricas em gases rarefeitos.
** **STEFAN**, Josef (1835-1893), físico austríaco, propôs, em 1879, de modo incompleto, a lei que leva seu nome. Seus trabalhos foram completados por seu discípulo Ludwig Boltzmann.
*** **BOLTZMANN**, Ludwig (1844-1906), notável físico austríaco, foi um dos criadores da teoria cinética dos gases. São importantes ainda seus trabalhos em Termodinâmica.

Vimos que o corpo negro tem absorvidade $a_{CN} = 1$ e emissividade $e_{CN} = 1$ ($a_{CN} = e_{CN}$). Para um corpo qualquer, Kirchhoff* estabeleceu que: $e = a$, isto é:

Numa mesma temperatura, a emissividade e a absorvidade de um corpo são iguais.

Esse enunciado, conhecido como **lei de Kirchhoff**, vem confirmar o que fora dito anteriormente: um bom absorvedor de calor é também um bom emissor.

Potência irradiada

A **potência irradiada** P por um corpo de emissividade e, à temperatura T e cuja área exposta ao ambiente é A, em face das fórmulas apresentadas, pode ser expressa por:

$$P = E \cdot A \Rightarrow \boxed{P = e \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A}$$

Se o corpo estiver em equilíbrio térmico com o ambiente, sua temperatura é constante e, portanto, ele estará emitindo e absorvendo energia com a mesma rapidez. Entretanto, se as temperaturas dele e do ambiente forem diferentes, haverá um fluxo líquido de energia. Assim, se o corpo estiver a uma temperatura T e o ambiente a uma temperatura T_A, a **potência líquida** P_L de ganho ou perda de energia será dada por:

$$P_L = e \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T^4)$$

Observe que a potência líquida P_L será positiva caso o ambiente esteja mais quente que o corpo ($T_A > T$), significando que o corpo está recebendo energia, isto é, absorve mais do que emite. A potência líquida P_L será negativa se o ambiente estiver mais frio que o corpo ($T_A < T$), o que significa que o corpo perde energia, isto é, emite mais do que absorve.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 40 Considere que a pele de uma pessoa tenha emissividade de 0,70 e sua área exposta seja de 0,27 m^2. Supondo que a temperatura da pele seja 37 °C e que o ambiente esteja a 27 °C, calcule:

a) o poder emissivo da pele;

b) a potência líquida que a pele irradia para o ambiente;

c) o módulo da quantidade de energia líquida irradiada pela pele no intervalo de uma hora.

(Dado: constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $W/m^2 \cdot K^4$)

Solução:

a) O poder emissivo de um corpo é dado pela fórmula $E = e \cdot \sigma \cdot T^4$. Nessa fórmula, a temperatura deve ser expressa em kelvins:
$T = \theta + 273 = 37 + 273 \Rightarrow T = 310$ K
Com esse valor, obtemos:
$E = 0{,}70 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot (310)^4 \Rightarrow$
$\Rightarrow \boxed{E \simeq 366{,}5 \text{ W/m}^2}$

b) A temperatura ambiente vale:
$T_A = \theta + 273 = 27 + 273 \Rightarrow T_A = 300$ K
Aplicando a fórmula da potência líquida irradiada pela pele, teremos:
$P_L = e \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T^4) =$
$= 0{,}70 \cdot 0{,}27 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot [(300)^4 - (310)^4] \Rightarrow$
$\Rightarrow \boxed{P_L \simeq -12{,}1 \text{ W}}$
O sinal negativo indica que a pele está perdendo calor (aproximadamente 12,1 joules por segundo), o que é lógico, uma vez que sua temperatura é maior que a do ambiente.

c) No intervalo de tempo $\Delta t = 1$ h $= 3.600$ s, a energia líquida perdida tem módulo dado por:
$Q = |P_L| \cdot \Delta t \simeq 12{,}1 \cdot 3.600 \Rightarrow \boxed{Q \simeq 4{,}36 \cdot 10^4 \text{ J}}$

Respostas: a) $\simeq 366{,}5$ W/m^2; b) $\simeq -12{,}1$ W; c) $\simeq 4{,}36 \cdot 10^4$ J

* **KIRCHHOFF**, Gustav Robert (1824-1887), físico alemão que apresentou importantes contribuições para a Física Experimental. Descobriu os princípios fundamentais da análise espectrográfica, tendo enunciado as leis da radiação e estabelecido o conceito de corpo negro.

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 128 Um objeto de esmissividade 0,40 encontra-se à temperatura de 17° C. A temperatura ambiente é de 37° C. Sendo 0,50 m^2 sua área exposta, determine:

a) seu poder emissivo;

b) a potência líquida absorvida;

c) a quantidade de energia líquida absorvida no intervalo de 10 minutos.

(Dado: constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$)

2 Aplicações e efeito da irradiação

Estufas

Uma **estufa de plantas** (fig. 12) tem paredes e teto de vidro transparente à energia radiante proveniente do Sol. O chão da estufa normalmente é pintado de preto ou de uma cor escura. A energia radiante que penetra através do vidro é absorvida pelo fundo escuro e demais objetos do interior da estufa, sendo a seguir novamente irradiada. Entretanto, essa reemissão de energia se dá na forma de raios infravermelhos de baixa frequência, que o vidro não deixa passar. Em consequência, o interior da estufa permanece sempre mais quente que o exterior. A perda de calor para o ambiente externo é mínima, o que é especialmente importante durante o período em que não há ação direta do Sol.

Figura 12. Estufa: o vidro é transparente à energia radiante incidente e opaco às ondas de calor reemitidas.

No mesmo princípio da estufa é baseado o **coletor de energia solar**, utilizado no aquecimento central de água em residências. O coletor consta basicamente de um recinto de paredes de vidro com fundo escuro. No seu interior está o encanamento que conduz a água a ser aquecida.

Estufa de plantas

Coletor solar

O efeito estufa

A presença do dióxido de carbono (CO_2), o mais abundante, do óxido nitroso (N_2O), do metano (CH_4), de água (sobretudo na forma de vapor) e de outros gases, na atmosfera, determina o **efeito estufa** (termo criado pelo químico sueco Svante Arrhenius, no século XIX). Ele constitui uma condição natural de nosso planeta, que garante à Terra uma temperatura média adequada à vida.

Figura 13. Esquema do efeito estufa

O princípio é o mesmo das estufas de plantas. A Terra recebe, durante o dia, a energia radiante do Sol e, durante a noite, irradia energia para o espaço. Entretanto, as substâncias citadas impedem que a superfície terrestre perca, durante a noite, uma quantidade exagerada de calor para o espaço, absorvendo e reemitindo boa parte dessa radiação para a Terra. A **figura 13** mostra esquematicamente como ocorre o efeito estufa na atmosfera. Caso ele não ocorresse, a temperatura média do nosso planeta seria de -18 °C (dezoito graus abaixo de zero!).

No decorrer do século 20 e no início do 21, tem ocorrido uma intensificação do efeito estufa, devido principalmente às indústrias e aos veículos automotores, que têm expelido para a atmosfera quantidades muito grandes de gases-estufa, isto é, as substâncias gasosas que determinam o efeito, principalmente o CO_2. Em consequência, a temperatura média da Terra tende a aumentar, com graves consequências ambientais.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *Efeito estufa e aquecimento global*

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=22 (acesso em julho/2009), você encontra *links* para vários artigos e reportagens referentes ao efeito estufa e ao aquecimento global, numa edição especial de revista eletrônica de jornalismo científico *Com Ciência*.

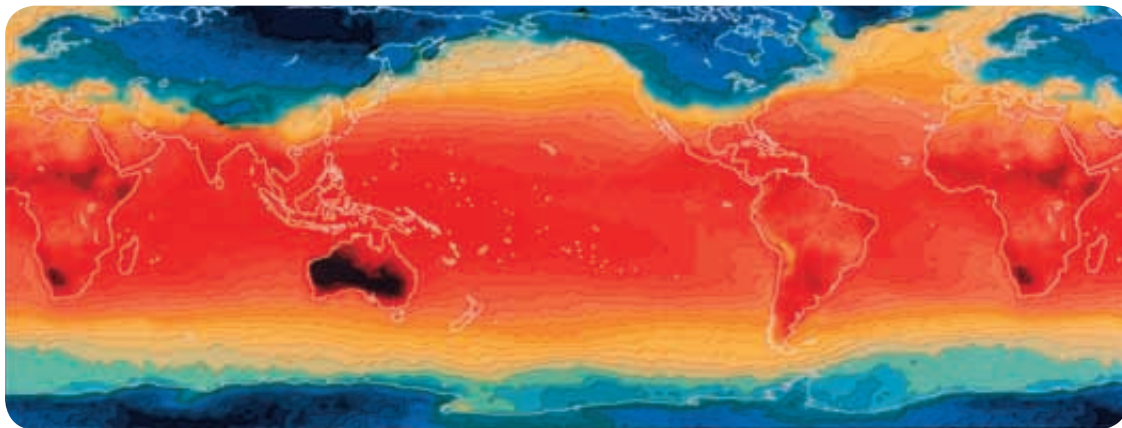
Usos dos raios infravermelhos

Os raios infravermelhos, isto é, as ondas de calor, têm larga aplicação.

A lâmpada de infravermelho (lâmpada de filamento com filtro que absorve a maior parte da luz visível), usada em medicina, serve também para a secagem de tintas e vernizes e para o aquecimento de ambientes.

A **termografia**, técnica muito utilizada atualmente na medicina e na indústria, consiste na obtenção de imagens (termogramas) por meio de câmeras especiais (termovisores), que captam as radiações infravermelhas emitidas pelos objetos. A análise do termograma impresso (ou na tela de um computador, ou do próprio termovisor) possibilita identificar regiões de diferentes temperaturas em um objeto. Desse modo é possível diagnosticar, por exemplo, um processo tumoral, pois a temperatura das células cancerosas é diferente da apresentada pelas células normais do mesmo tecido.

Termografia de uma chaleira sobre o fogo.

Na meteorologia, satélites detectam as emissões de infravermelho da Terra, tornando possíveis previsões de temperaturas e condições climáticas. Certos mísseis "farejam" seu alvo pelas ondas de calor que este emite. Em lunetas especiais, os raios infravermelhos emitidos por um corpo são recebidos em um anteparo que os transforma em luz visível. Com esse aparelho é possível "enxergar" em completa escuridão. Existem películas fotográficas sensíveis aos raios infravermelhos, que possibilitam a tomada de fotos num ambiente totalmente escuro.

Termografia da superfície terrestre. A figura é obtida, por meio de satélite, a partir da radiação infravermelha emitida pela Terra.

A garrafa térmica

É um dispositivo feito para conservar, com alteração mínima de temperatura e por longo tempo, um líquido gelado ou quente. Na garrafa térmica são minimizadas as trocas de calor que ocorreriam pelos três processos de propagação.

A garrafa (figura 14) é feita de vidro (mau condutor) com paredes duplas, entre as quais é feito o vácuo. Assim, retirando-se moléculas desse espaço, minimiza-se a ocorrência de *condução*. A *convecção* é reduzida ao mínimo por meio da vedação da garrafa com uma tampa apropriada. As faces externa e interna da garrafa são espelhadas, a fim de minimizar a *irradiação*, tanto de dentro para fora como de fora para dentro.

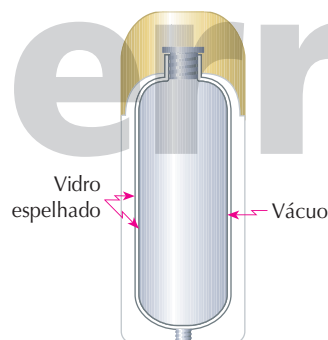



Figura 14. **Garrafa térmica.**

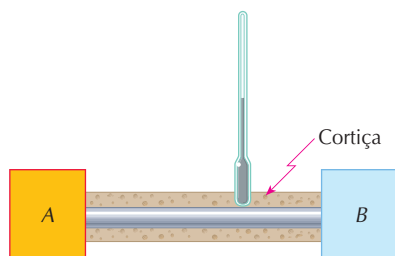
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 129 (Olimpíada Brasileira de Física) Um galpão possui área $A = 300\ m^2$ de paredes laterais, laje, janelas e portas. O coeficiente de condutibilidade térmica média deste conjunto é $K = 0{,}50\ W/m \cdot °C$; a espessura média é $x = 0{,}20\ m$. Num inverno, deseja-se manter constante, em 20 °C, a diferença de temperatura $\Delta\theta$ do ar no interior e no exterior do galpão, durante o período de um mês. Em paredes sólidas, sabe-se que a quantidade de calor transmitida por segundo de uma face à face oposta é diretamente proporcional à área e à diferença de temperatura entre as faces, e inversamente proporcional à espessura. Essa quantidade de calor depende também da natureza do material que conduz o calor, ou seja, do seu coeficiente de condutividade térmica. Matematicamente:

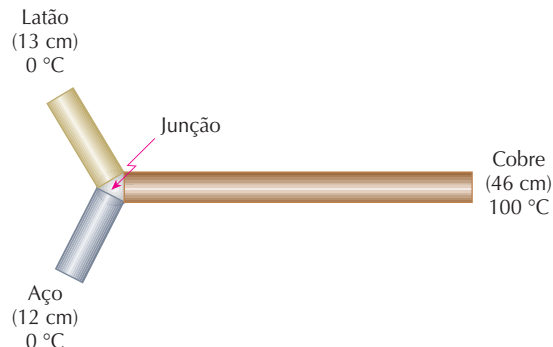
$$Q = \frac{K \cdot A \cdot \Delta\theta}{x}$$

a) Qual é o custo mensal para manter constante a temperatura do ambiente interno por meio de lâmpadas acesas, considerando que 1 MWh de energia elétrica custa R$ 120,00?

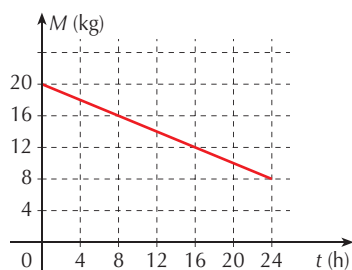
b) Caso a temperatura interna seja mantida constante mediante um aquecedor a gás, qual será o volume mensal necessário para um gás com calor de combustão $C = 9.000\ kcal/m^3$ e 100% de rendimento do processo?

P. 130 (UEA-AM) A figura apresenta uma barra de chumbo de 40 cm de comprimento e área de secção transversal de 10 cm^2 isolada com cortiça; um termômetro fixo na barra calibrado na escala Fahrenheit e dois dispositivos *A* e *B* que proporcionam, nas extremidades da barra, as temperaturas correspondentes aos pontos do vapor e do gelo, sob pressão normal, respectivamente.

Considerando a intensidade da corrente térmica constante ao longo da barra, determine a temperatura registrada no termômetro, sabendo-se que ele se encontra a 32 cm do dispositivo A.

Dado: coeficiente de condutibilidade térmica do chumbo $= 8 \cdot 10^{-2} \dfrac{\text{cal} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^2 \cdot {}^\circ\text{C} \cdot \text{s}}$.

P. 131 (Mackenzie-SP) Têm-se três cilindros de mesmas secções transversais de cobre, latão e aço, cujos comprimentos são, respectivamente, de 46 cm, 13 cm e 12 cm. Soldam-se os cilindros, formando o perfil em Y indicado na figura. O extremo livre do cilindro de cobre é mantido a 100 °C e os cilindros de latão e aço a 0 °C.

Suponha que a superfície lateral dos cilindros esteja isolada termicamente. As condutibilidades térmicas do cobre, do latão e do aço valem, respectivamente, 0,92, 0,26 e 0,12 expressas em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$. No estado estacionário de condução, qual é a temperatura na junção?

TESTES PROPOSTOS

T. 129 (Fuvest-SP) Um recipiente de isopor, que é um bom isolante térmico, tem em seu interior água e gelo em equilíbrio térmico. Num dia quente, a passagem de calor por suas paredes pode ser estimada, medindo-se a massa de gelo M presente no interior do isopor, ao longo de algumas horas, como representado no gráfico (dado: calor latente de fusão do gelo ≃ 320 kJ/kg).

Esses dados permitem estimar a transferência de calor pelo isopor como sendo, aproximadamente, de:

a) 0,5 kJ/h
b) 5 kJ/h
c) 120 kJ/h
d) 160 kJ/h
e) 320 kJ/h

T. 130 (UFSCar-SP) Um grupo de amigos compra barras de gelo para um churrasco, num dia de calor. Como as barras chegam com algumas horas de antecedência, alguém sugere que sejam envolvidas num grosso cobertor para evitar que derretam demais. Essa sugestão:

a) é absurda, porque o cobertor vai aquecer o gelo, derretendo-o ainda mais depressa.
b) é absurda, porque o cobertor facilita a troca de calor entre o ambiente e o gelo, fazendo com que ele derreta ainda mais depressa.
c) é inócua, pois o cobertor não fornece nem absorve calor ao gelo, não alterando a rapidez com que o gelo derrete.
d) faz sentido, porque o cobertor facilita a troca de calor entre o ambiente e o gelo, retardando o seu derretimento.
e) faz sentido, porque o cobertor dificulta a troca de calor entre o ambiente e o gelo, retardando o seu derretimento.

T. 131 (PUC-SP) Analise as afirmações referentes à condução térmica.

I. Para que um pedaço de carne cozinhe mais rapidamente, pode-se introduzir nele um espeto metálico. Isso se justifica pelo fato de o metal ser um bom condutor de calor.
II. Os agasalhos de lã dificultam a perda de energia (na forma de calor) do corpo humano para o ambiente, devido ao fato de o ar aprisionado entre suas fibras ser um bom isolante térmico.
III. Devido à condução térmica, uma barra de metal mantém-se a uma temperatura inferior à de uma barra de madeira colocada no mesmo ambiente.

Podemos afirmar que:

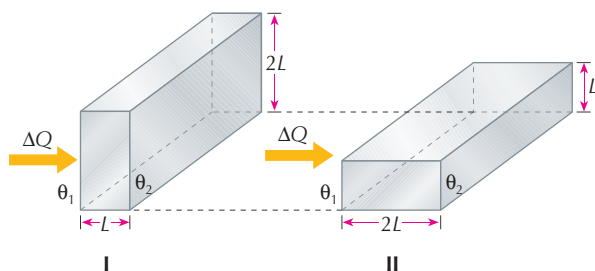
a) I, II e III estão corretas.
b) I, II e III estão erradas.
c) apenas I está correta.
d) apenas II está correta.
e) apenas I e II estão corretas.

T. 132 (UFV-MG) Uma mesa de madeira e uma de metal são colocadas em uma mesma sala fechada, com temperatura constante. Depois de alguns dias, um estudante entra na sala e coloca uma das mãos na mesa de madeira e a outra na de metal. O estudante afirma, então, que a mesa de metal está mais fria do que a mesa de madeira, isto é, a uma temperatura menor do que esta. Em relação a esta afirmação, pode-se dizer:

a) O estudante está correto. A condutividade térmica do metal é menor do que a da madeira e, portanto, nesse caso, o metal sempre estará a uma temperatura menor do que a da madeira.
b) O estudante está correto. A condutividade térmica do metal é maior do que a da madeira e, portanto, nesse caso, o metal sempre estará a uma temperatura menor do que a da madeira.
c) O estudante está errado. A mesa de madeira sempre estará mais fria do que a de metal, mas isto só poderá ser verificado com o uso de um termômetro preciso.
d) O estudante está errado. As duas mesas estão à mesma temperatura, mas a mesa de metal parece mais fria do que a de madeira devido ao fato de a condutividade térmica do metal ser maior do que a da madeira.
e) O estudante está errado. As duas mesas estão à mesma temperatura, mas a mesa de metal parece mais fria do que a de madeira devido ao fato de a condutividade térmica do metal ser menor do que a da madeira.

T. 133 (UFMA) O senhor Newton resolveu fazer uma geladeira em sua casa. Construiu duas caixas de madeira, tais que uma cabia dentro da outra e ainda sobrava um espaço entre as duas. Esse espaço foi preenchido com pó de serragem de madeira.

a) O resultado foi bom devido à baixa capacidade térmica da serragem.
b) O resultado foi bom porque o gelo, formado dentro da geladeira, tendo baixo calor específico, fará com que a serragem funcione como isolante térmico.
c) O resultado foi bom porque a serragem tem elevada capacidade térmica.
d) O resultado foi bom porque a serragem se compactou numa placa homogênea.
e) O resultado foi bom porque o ar preso na serragem funciona como um bom isolante térmico.

T. 134 (Afa-SP) Suponha que uma determinada quantidade de calor ΔQ flua, em regime estacionário, através de uma barra de uma superfície mantida à temperatura θ_1, para a superfície oposta mantida à temperatura θ_2, nas situações I e II, abaixo ilustradas.

A mesma quantidade de calor ΔQ gasta tempos Δt_1 e Δt_2 para atravessar a barra nas situações I e II, respectivamente. A razão $\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}$ vale:

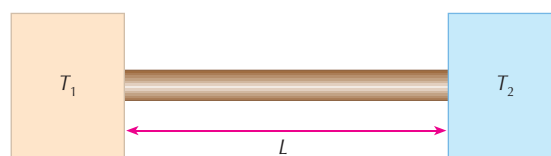
a) $\frac{1}{4}$ b) $\frac{1}{2}$ c) 2 d) 4

T. 135 (Enem-MEC) A padronização insuficiente e a ausência de controle na fabricação podem resultar em perdas significativas de energia através das paredes de uma geladeira. Essas perdas, em função da espessura das paredes, para geladeiras e condições de uso típicas, são apresentadas na tabela.

Espessura das paredes (cm)	Perda térmica mensal (kWh)
2	65
4	35
6	25
10	15

Considerando uma família típica, com consumo médio mensal de 200 kWh, a perda térmica pelas paredes de uma geladeira com 4 cm de espessura, relativamente a outra de 10 cm, corresponde a uma porcentagem do consumo total de eletricidade da ordem de:

a) 30% d) 5%
b) 20% e) 1%
c) 10%

T. 136 (Esal-MG) A figura mostra um corpo à temperatura T_1 (fonte), colocado em contato com um corpo à temperatura T_2 (sumidouro), através de uma barra metálica condutora de comprimento L e condutividade térmica K.

Sendo $T_1 > T_2$ na condição de equilíbrio (estável), pode-se afirmar que:

I. A temperatura ao longo da barra não varia, sendo igual a $\frac{(T_1 - T_2)}{2}$.
II. A temperatura ao longo da barra decresce linearmente da esquerda para a direita.
III. A temperatura no ponto médio da barra $\left(\frac{L}{2}\right)$ é igual a $\frac{(T_1 + T_2)}{2}$.

a) As três afirmativas são corretas.
b) Apenas as afirmativas II e III são corretas.
c) Apenas a afirmativa II é correta.
d) Apenas a afirmativa III é correta.
e) Nenhuma das afirmativas é correta.

T. 137 (UFSCar-SP) Nas geladeiras, retira-se periodicamente o gelo do congelador. Nos polos, as construções são feitas sob o gelo. Os viajantes do deserto do Saara usam roupas de lã durante o dia e à noite. Relativamente ao texto acima, qual das afirmações abaixo não é correta?

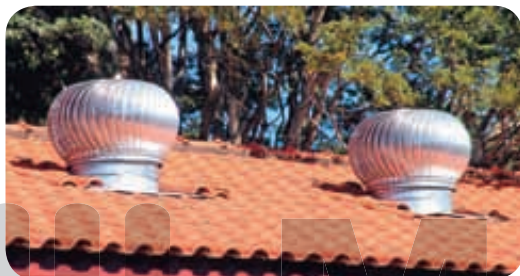
a) O gelo é mau condutor de calor.

b) A lã evita o aquecimento do viajante do deserto durante o dia e o resfriamento durante a noite.

c) A lã impede o fluxo de calor por condução e diminui as correntes de convecção.

d) O gelo, sendo um corpo a 0 °C, não pode dificultar o fluxo de calor.

e) O ar é um ótimo isolante para o calor transmitido por condução, porém favorece muito a transmissão do calor por convecção. Nas geladeiras, as correntes de convecção é que refrigeram os alimentos que estão na parte inferior.

T. 138 (UEA-AM) Os exaustores na foto abaixo são dispositivos usados para retirar o ar quente do interior de um ambiente, sem qualquer acionamento artificial.

Mesmo assim, as hélices dos exaustores giram. Uma explicação correta para o movimento das hélices é:

a) a passagem do ar quente da parte interna para a externa, através do exaustor.

b) a passagem do ar quente da parte externa para a interna, através do exaustor.

c) a passagem do ar frio da parte externa para a interna, através do exaustor.

d) a propagação do calor por condução da parte interna para o meio exterior.

e) a propagação do calor por irradiação da parte interna para o meio exterior.

T. 139 (Uepa) As maiores temperaturas em nosso planeta estão no núcleo, chegando a mais de 4.000 °C. Acima do núcleo está o manto, a parte fluida do interior da Terra. A parte sólida que recobre a superfície do planeta é chamada de crosta. Considere os fenômenos descritos abaixo, sobre o fluxo de calor em diferentes regiões do planeta.

I. Calor é transferido do núcleo para camadas mais rasas da Terra, o que provoca movimentação da massa fluida do manto.

II. A temperatura da crosta aumenta com a profundidade. A variação da temperatura com a profundidade da crosta é chamada de gradiente geotérmico, medido em °C/km. Na crosta, o calor se propaga das camadas sólidas de rocha mais profundas para as de menor profundidade.

III. A superfície da Terra é aquecida durante o dia por uma quantidade de energia enorme que chega do Sol e se resfria à noite, liberando calor para a atmosfera.

As descrições acima enfatizam três processos de transferência de calor. Marque a alternativa com a correspondência correta entre cada fenômeno descrito e o respectivo processo de transferência de calor.

a) I - Condução; II - Convecção; III - Radiação.

b) I - Convecção; II - Radiação; III - Condução.

c) I - Radiação; II - Condução; III - Convecção.

d) I - Condução; II - Radiação; III - Convecção.

e) I - Convecção; II - Condução; III - Radiação.

T. 140 (Enem-MEC) A refrigeração e o congelamento de alimentos são responsáveis por uma parte significativa do consumo de energia elétrica numa residência típica.
Para diminuir as perdas térmicas de uma geladeira, podem ser tomados alguns cuidados operacionais:

I. Distribuir os alimentos nas prateleiras deixando espaços vazios entre eles, para que ocorra a circulação do ar frio para baixo e do quente para cima.

II. Manter as paredes do congelador com camada bem espessa de gelo, para que o aumento da massa de gelo aumente a troca de calor no congelador.

III. Limpar o radiador (“grade” na parte de trás) periodicamente, para que a gordura e a poeira que nele se depositam não reduzam a transferência de calor para o ambiente.

Para uma geladeira tradicional é correto indicar, apenas:

a) a operação I.

b) a operação II.

c) as operações I e II.

d) as operações I e III.

e) as operações II e III.

T. 141 (Fuvest-SP) Têm-se dois corpos com a mesma quantidade de água, um aluminizado *A* e outro negro *N*, que ficam expostos ao Sol durante uma hora. Sendo inicialmente as temperaturas iguais, é mais provável que ocorra o seguinte:

a) Ao fim de uma hora não se pode dizer qual temperatura é maior.

b) As temperaturas são sempre iguais em qualquer instante.

c) Após uma hora, a temperatura de *N* é maior do que a de *A*.

d) De início, a temperatura de *A* decresce (devido à reflexão) e a de *N* aumenta.

e) As temperaturas de *N* e de *A* decrescem (devido à evaporação) e depois crescem.

T. 142 (Esal-MG) A interpretação da lei de Stefan-Boltzmann (radiação) nos permite concluir que:

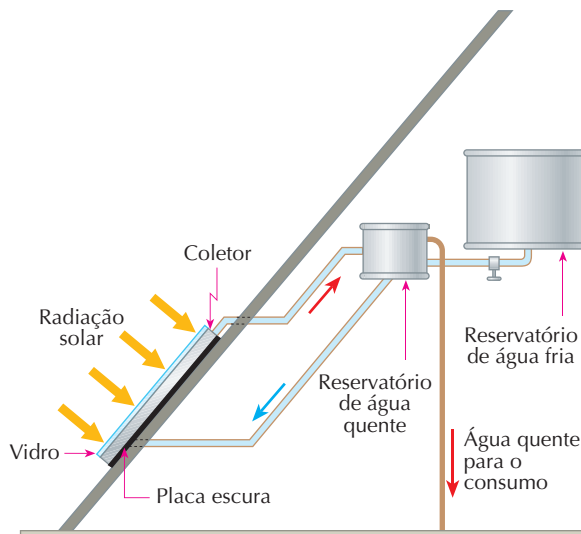
a) a energia radiante emitida por um corpo é proporcional à temperatura absoluta.

b) os corpos só emitem energia radiante a uma temperatura acima de 0 °C (273 K).

c) a energia radiante emitida por um corpo depende da emissividade do corpo e da temperatura absoluta do corpo elevada à quarta potência.

d) um corpo à temperatura de 0 °C (273 K) não emite energia radiante.

e) a energia radiante emitida por um corpo é proporcional à temperatura absoluta ao quadrado.

T. 143 (Enem-MEC) O resultado da conversão direta de energia solar é uma das várias formas de energia alternativa de que se dispõe. O aquecimento solar é obtido por uma placa escura coberta por vidro, pela qual passa um tubo contendo água. A água circula, conforme mostra o esquema abaixo.

Fonte: Adaptado de PALZ, Wolfgang. *Energia Solar e fontes alternativas*. Hemus, 1981.

São feitas as seguintes afirmações quanto aos materiais utilizados no aquecedor solar:

I. O reservatório de água quente deve ser metálico para conduzir melhor o calor.

II. A cobertura de vidro tem como função reter melhor o calor, de forma semelhante ao que ocorre em uma estufa.

III. A placa utilizada é escura para absorver melhor a energia radiante do Sol, aquecendo a água com maior eficiência.

Dentre as afirmações acima, pode-se dizer que apenas está(ão) correta(s):

a) I.
b) I e II.
c) II.
d) I e III.
e) II e III.

T. 144 (Uepa) O efeito estufa é um fenômeno natural, característico de planetas onde existe atmosfera. Ele acontece na atmosfera da Terra e também na de Vênus, onde o efeito é muito acentuado e a temperatura alcança valores de cerca de 460 °C. Embora importante para a manutenção da vida no planeta, hoje é uma preocupação para muitos ambientalistas e cientistas. Com base em seus conhecimentos sobre o efeito estufa, analise as seguintes afirmativas.

I. Existem materiais, como o vidro, que permitem a passagem de luz, mas dificultam a passagem da radiação térmica. Numa estufa com cobertura de vidro, por exemplo, parte da luz que entra é absorvida pelas plantas. Estas, sendo aquecidas, emitem radiação infravermelha que tem dificuldade para atravessar o vidro e aquece o interior da estufa. Este efeito é semelhante ao que acontece na atmosfera da Terra, daí o nome "efeito estufa".

II. O efeito estufa é importante porque retém o calor na Terra, possibilitando a vida de animais e vegetais. Sua intensificação é que é danosa, ocasionando o aumento da temperatura do planeta. Como consequência disto, entre outras coisas, parte da ilha do Marajó poderá ser inundada e os furacões no Caribe poderão ser mais frequentes e devastadores.

III. No efeito estufa, a radiação solar atravessa a atmosfera, parte é absorvida pela Terra e parte é refletida. Uma parcela da radiação absorvida é reemitida na forma de raios ultravioleta (ondas de calor), que têm pequeno comprimento de onda, dos quais uma pequena parte é absorvida, principalmente pelo gás carbônico, vapor-d'água e metano, nas altas camadas atmosféricas, criando um manto quente na superfície da Terra.

IV. Na Lua não há ocorrência de efeito estufa, em virtude de não existir atmosfera. Isto é uma das causas das temperaturas no nosso satélite variarem entre −150 °C durante a noite e 100 °C durante o dia.

Estão corretas somente as afirmativas:

a) I, II e IV.
b) I, II e III.
c) I, III e IV.
d) I e II.
e) II e IV.

T. 145 (UEPB) Até o início do século XIX, acreditava-se que a temperatura de um corpo estava associada a uma substância fluida, invisível e de peso desprezível, denominada calórico, contida no interior do corpo. No decorrer do mesmo século essas ideias foram contestadas e, através de algumas experiências, a exemplo de uma realizada pelo físico inglês James Prescott Joule (1818-1889), identificou-se definitivamente o calor como energia. Com base nas informações contidas no texto acima e em suas experiências diárias, analise as seguintes proposições:

I. Quando colocamos a mão na maçaneta e na madeira de uma porta, a sensação distinta de quente e frio está associada à diferença de temperatura entre ambas.

II. Ao colocar a mão embaixo de uma panela retirada do fogo a uma certa distância, tem-se a sensação de quente, uma vez que a troca de calor neste processo dá-se por convecção.

III. Retirando-se da geladeira uma lata e uma garrafa (de vidro) de refrigerante em equilíbrio térmico, tem-se a impressão de que a lata está mais fria que a garrafa. Esta sensação diferenciada é explicada por a lata, que geralmente é de alumínio, apresentar maior coeficiente de condutividade térmica do que a garrafa de vidro.

IV. As garrafas térmicas são constituídas de um recipiente de vidro de paredes duplas, espelhadas interna e externamente. A quase inexistência de ar entre as paredes dificulta a propagação do calor por condução.

A partir da análise feita, assinale a alternativa correta.

a) Todas as proposições são verdadeiras.
b) Apenas as proposições I e III são verdadeiras.
c) Apenas as proposições II e III são verdadeiras.
d) Apenas as proposições II e IV são verdadeiras.
e) Apenas as proposições III e IV são verdadeiras.

T. 146 (Unemat-MT) "A ideia de que a atividade industrial poderia alterar radicalmente o clima da terra remonta a 1896 e ao químico sueco Svante August Arrhenius, que mostrou, através de um cálculo simples, que o acúmulo de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentaria a temperatura da superfície em, aproximadamente, 5 graus centígrados."

MADDOX, John. *O que falta descobrir*. Campus, 1999.

Com relação ao "efeito estufa", podemos afirmar que:

01) o efeito estufa é totalmente prejudicial ao ser humano.
02) a atmosfera é transparente à energia radiante e opaca para as ondas de calor.
04) o (CO_2) é o único gás responsável pelo efeito estufa.
08) o gás carbônico, o vapor de água, o metano e os clorofluorcarbonos também contribuem para o efeito estufa.
16) a queima de combustíveis fósseis contribui para o aquecimento global.

Dê, como resposta, a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

T. 147 (UTFPR) Sobre os processos de propagação do calor, é **incorreto** afirmar que:

a) a inversão térmica é um fenômeno que ocorre no inverno e caracteriza-se pela ausência de convecção entre o ar puro das camadas superiores a o ar frio poluído, resultante da contaminação por veículos e indústrias.
b) a estufa de plantas é feita de vidro, ou outro material transparente, para que a energia radiante do Sol penetre, mas não permita a passagem das ondas puramente térmicas, emitidas pelos objetos no seu interior.
c) na construção de garrafas térmicas, utiliza-se uma dupla parede de vidro por ser este um material bom condutor de calor.
d) a absorção da radiação térmica está intrinsecamente relacionada com a cor e o grau de polimento do corpo que a recebe.
e) no inverno os pássaros eriçam suas penas para que haja acúmulo de ar em seu interior, que atua como um isolante térmico.

T. 148 (PUC-SP) Calor é uma forma de energia que se transfere de um corpo para outro em virtude de uma diferença de temperatura entre eles. Há três processos de propagação de calor: condução, convecção e radiação. Em relação à transferência de calor, afirma-se que:

I. Em dias frios, os pássaros costumam eriçar suas penas para acumular ar entre elas. Nesse caso, o ar acumulado constitui-se em um bom isolante térmico diminuindo as trocas de calor, por condução, com o ambiente.

II. Correntes de convecção na atmosfera costumam ser aproveitadas por aviões planadores e asas-delta para ganharem altura. Tais correntes são originadas por diferenças de temperaturas entre duas regiões da Terra.

III. As paredes internas das garrafas térmicas são espelhadas com o objetivo de diminuir as trocas de calor por radiação.

Está correto o que se afirma em:

a) I, II e III.
b) apenas I e II.
c) apenas I e III.
d) apenas II e III.
e) apenas III.

Capítulo

8

Estudo dos gases

A pressão, a temperatura e o volume dos gases perfeitos se relacionam por leis simples que são interpretadas por dois pontos de vista, o macroscópico e o microscópico.

O funcionamento de um balão de ar quente se baseia na variação da densidade do ar existente no balão. Essa variação é ocasionada pelo aquecimento ou resfriamento do ar, permitindo que o balão suba ou desça conforme a necessidade do piloto.

Seção 8.1

As transformações gasosas

Objetivos

- Estudar o comportamento de um gás ideal.
- Conhecer as grandezas que caracterizam o estado de um gás ideal.
- Relacionar pressão e temperatura na transformação isométrica (ou isocórica) de uma dada massa de gás ideal.
- Relacionar volume e temperatura na transformação isobárica de uma dada massa de gás ideal.
- Relacionar pressão e volume na transformação isotérmica de uma dada massa de gás ideal.

Termos e conceitos

- **compressibilidade de um gás**
- **expansibilidade de um gás**
- **variáveis de estado**
- **isométrica**
- **isobárica**
- **isotérmica**
- **isoterma**

A **compressibilidade** e a **expansibilidade** são características mais notáveis dos gases. Assim, gás é um fluido que sofre grandes variações de volume quando submetido a pressões relativamente pequenas e que tende a ocupar todo o espaço que lhe é oferecido.

Os conceitos apresentados no presente capítulo valem para os chamados gases perfeitos (ou ideais). **Gás ideal** ou **perfeito** é um gás hipotético, isto é, um modelo, definido para que as grandezas que o caracterizam possam ser relacionadas por expressões matemáticas simples.

A teoria cinética dos gases é formulada adiante, na seção 8.4, estabelecendo as características dos gases ideais, mas desde já podemos trabalhar com algumas de suas propriedades. Assim, as moléculas de um gás ideal não apresentam volume próprio, de modo que o volume ocupado pelo gás corresponde ao volume dos "vazios" entre suas moléculas, ou seja, ao volume do recipiente que o contém. Outra característica do gás ideal é a inexistência de forças coesivas entre suas moléculas. Por isso ele não sofre mudança de fase; quaisquer que sejam suas condições, ele está sempre na fase gasosa.

Um gás real, isto é, um gás que existe na Natureza (oxigênio, nitrogênio, hidrogênio etc.) pode apresentar um comportamento que se aproxima do previsto para o gás ideal, em determinadas condições, como analisaremos posteriormente. Nessa situação, aplicamos ao gás real as relações estabelecidas para o gás ideal.

O estado de um gás é caracterizado pelos valores assumidos por três grandezas, o **volume** (V), a **pressão** (p) e a **temperatura** (T), que constituem as **variáveis de estado**.

Certa quantidade de gás sofre uma transformação de estado quando se modificam ao menos duas das variáveis de estado.

Transporte de gás liquefeito, em cilindro de alta pressão.

É impossível para um gás a alteração de apenas uma variável de estado. Quando varia uma dessas grandezas, necessariamente pelo menos outra variável também se altera.

Vamos estudar as transformações em que uma das variáveis se mantém constante, variando portanto as outras duas. Esse estudo é eminentemente experimental e dele se concluem as leis que descrevem essas transformações.

1 Transformação isocórica

Uma transformação gasosa na qual a pressão p e a temperatura T variam e o volume V é mantido constante é chamada **transformação isocórica** (do grego: *isos*, igual; *koros*, volume) ou **transformação isométrica**.

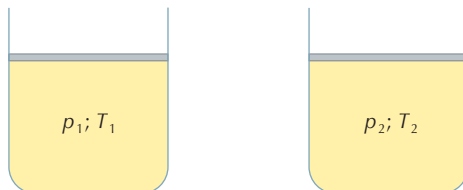
Considere certa massa de um gás ideal que ocupa inicialmente um volume V, e apresenta pressão p_1 e temperatura T_1. Se ele for aquecido até uma temperatura T_2 e seu volume for mantido constante, sua pressão se eleva para um valor p_2 (**fig. 1**).

$p_1; T_1$ $p_2; T_2$

Figura 1. Transformação isocórica. O êmbolo é travado para que o volume V se mantenha constante.

Verifica-se experimentalmente que as pressões e as temperaturas absolutas nesse processo relacionam-se pela fórmula:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

A volume constante, a pressão e a temperatura absoluta de um gás ideal são diretamente proporcionais.

Por "diretamente proporcional" entenda que, quando a pressão aumenta, a temperatura absoluta aumenta na mesma proporção; quando a pressão diminui, a temperatura absoluta diminui na mesma proporção.

Essa relação foi descoberta por dois físicos franceses, **Charles** e **Gay-Lussac**, e é comumente conhecida pelo nome de **lei de Charles** para a transformação isocórica.

De acordo com essa lei, a temperatura de um gás ideal a volume constante diminui à medida que se reduz sua pressão. Portanto, a temperatura mais baixa que tem significado físico corresponde à pressão nula do gás resfriado isocoricamente. Essa temperatura é −273,15 °C (que se costuma aproximar para −273 °C) ou 0 K (zero kelvin).

A temperatura de −273,15 °C (0 K) é denominada **zero absoluto**.

Jacques Charles (1746-1823), físico francês. Verificou a interdependência entre volume e temperatura (pressão constante) e pressão e temperatura (volume constante) para um gás.

Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), físico e químico francês. Entre vários outros trabalhos importantes, confirmou as conclusões obtidas por Charles para a transformação isocórica de um gás.

Graficamente, se representarmos a pressão p em ordenadas e a temperatura absoluta T em abscissas, obtemos uma reta que passa pela origem. Trata-se de uma função linear, isto é, a pressão é diretamente proporcional à temperatura absoluta (**fig. 2A**). A **figura 2B** indica a mesma transformação isocórica quando se representa em abscissas a temperatura expressa em graus Celsius (°C).

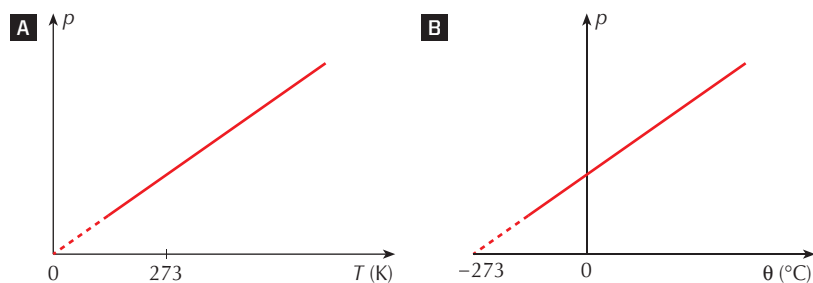



Figura 2. Observe que no zero absoluto (0 K ou −273 °C) a pressão do gás se tornaria nula. Essa situação é irrealizável.

Na transformação isocórica, o volume V é uma função constante em relação à pressão p (**fig. 3A**) e em relação à temperatura T (**fig. 3B**).

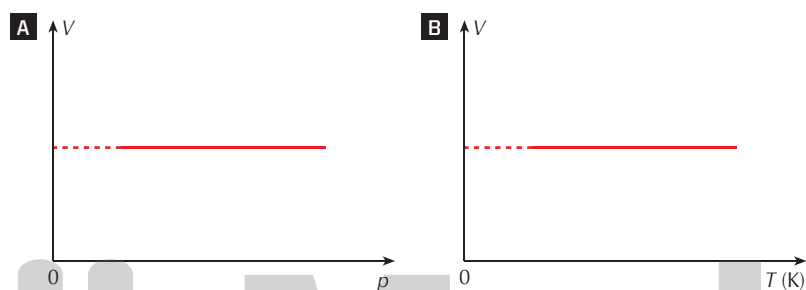



Figura 3. Transformação isocórica: V é função constante em relação à pressão e à temperatura.

2 Transformação isobárica

Uma transformação gasosa na qual o volume V e a temperatura T variam e a pressão p é mantida constante é chamada **transformação isobárica** (do grego: *isos*, igual; *baros*, pressão).

Submetendo certa massa de gás ideal ao processo experimental da **figura 4**, no qual a pressão p se mantém constante, verifica-se que, quando a temperatura absoluta aumenta de T_1 para T_2, o volume aumenta de V_1 para V_2. Esses valores relacionam-se pela fórmula:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Sob pressão constante, o volume e a temperatura absoluta de um gás ideal são diretamente proporcionais.

Essa relação constitui a **lei de Charles** para a transformação isobárica.

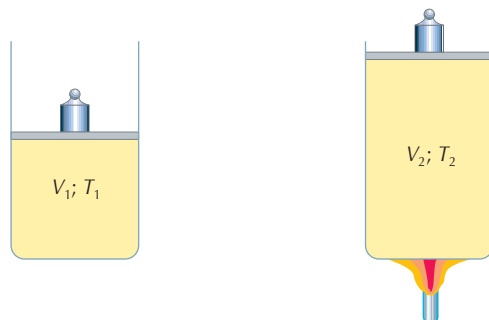



Figura 4. Transformação isobárica.

Se representarmos o volume V em ordenadas e a temperatura T em abscissas, o gráfico da fórmula anterior (o volume é diretamente proporcional à temperatura absoluta) será uma reta que passará pela origem (função linear), como na **figura 5A**. A **figura 5B** indica a mesma transformação isobárica, quando se coloca em abscissas a temperatura em graus Celsius.

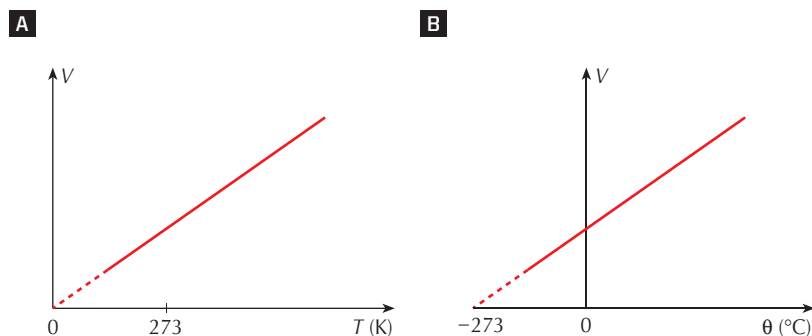



Figura 5. Observe que no zero absoluto (0 K ou −273 °C) o volume do gás se reduziria a zero. Essa situação é irrealizável.

Na transformação isobárica, a pressão p é uma função constante em relação ao volume V (**fig. 6A**) e em relação à temperatura T (**fig. 6B**).

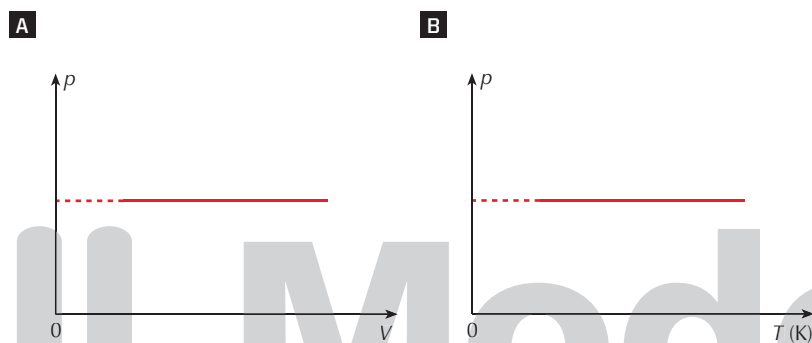



Figura 6. Transformação isobárica: p é função constante em relação ao volume e à temperatura.

3 Transformação isotérmica

Uma transformação gasosa na qual a pressão p e o volume V variam e a temperatura T é mantida constante é chamada **transformação isotérmica** (do grego: *isos*, igual; *termo*, temperatura).

Se mantivermos certa massa de gás ideal em temperatura constante T, verificamos experimentalmente que, se o volume for reduzido de um valor inicial V_1 para um valor final V_2, a pressão aumenta do valor inicial p_1 para o valor final p_2 (**fig. 7**).

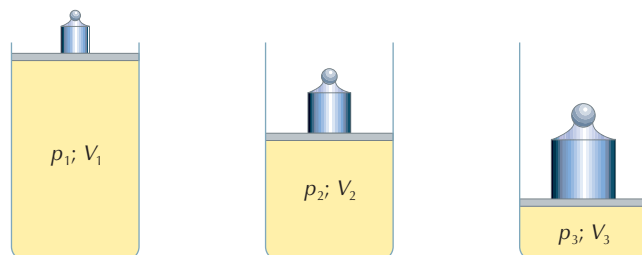



Figura 7. Transformação isotérmica.

Dessa maneira, na transformação isotérmica vale a fórmula:

$$p_1V_1 = p_2V_2$$

A pressão e o volume de um gás ideal, mantido em temperatura constante, são inversamente proporcionais.

Por "inversamente proporcionais" entenda que, quando a pressão aumenta, o volume decresce na mesma proporção e vice-versa.

Essa relação é chamada **lei de Boyle***, em homenagem ao físico que a descobriu.

Se representarmos a pressão p em ordenadas e o volume V em abscissas, o gráfico que expressa a lei de Boyle (a pressão é inversamente proporcional ao volume) é uma curva denominada **isoterma**, correspondente a um **ramo de hipérbole equilátera** (**fig. 8**).

Observe que, se a transformação isotérmica se realizar numa temperatura $T' > T$, o valor do produto pV será mais elevado, e portanto a hipérbole representativa ficará mais afastada dos eixos.

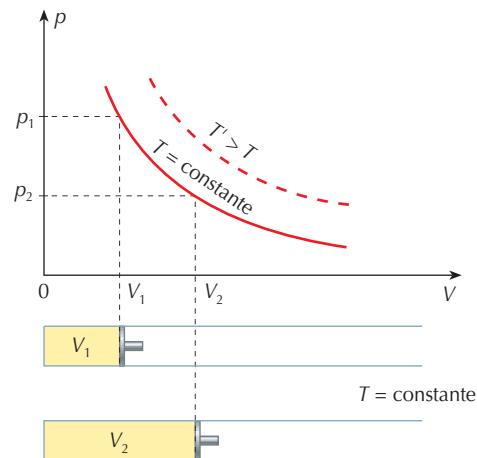



Figura 8. **Gráfico representando a transformação isotérmica.**

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boyle.html (em inglês, acesso em julho/2009), você encontra uma simulação da lei de Boyle.
No endereço eletrônico http://www.walter-fendt.de/ph14br/gaslaw_br.htm (acesso em julho/2009), você poderá analisar, por meio de simulações, as leis que regem as transformações gasosas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 41 O volume ocupado por certa massa de um gás ideal varia com a temperatura absoluta de acordo com a tabela:

V (m³)	1,0	1,5	2,5	3,5	6,5
T (K)	160	240	400	560	1.040

a) Que tipo de transformação o gás está sofrendo?

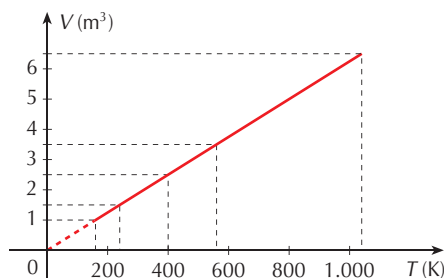
b) Construa um gráfico com os valores da tabela, colocando o volume (V) em ordenadas e a temperatura absoluta (T) em abscissas.

Solução:

a) Perceba que a relação entre o volume (V) e a temperatura (T) é a mesma para todos os valores da tabela:

$$\frac{V}{T} = \frac{1}{160} = \frac{1,5}{240} = \frac{2,5}{400} = \frac{3,5}{560} = \frac{6,5}{1.040} = \text{constante}$$

Portanto, o gás está sofrendo uma transformação isobárica, isto é, a pressão se mantém constante.

b) Lançando os valores no diagrama $V \times T$, obtemos o gráfico representado abaixo.

Note que o prolongamento da reta obtida passa pela origem, ponto que corresponde ao zero absoluto.

Respostas: a) Transformação isobárica; b) (gráfico).

* **BOYLE**, Robert (1627-1691), físico e químico irlandês, é autor de trabalhos sobre a combustão e a compressibilidade do ar.

R. 42 A pressão de um gás ideal varia com a temperatura absoluta de acordo com a tabela:

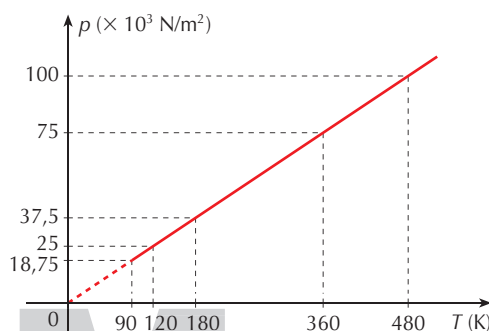
p (N/m^2)	10^5	$7{,}5 \cdot 10^4$	$37{,}5 \cdot 10^3$	$25 \cdot 10^3$	$187{,}5 \cdot 10^2$
T (K)	480	360	180	120	90

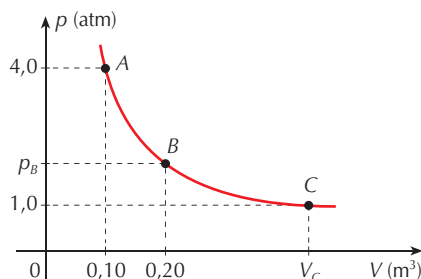
a) Que tipo de transformação o gás está sofrendo?
b) Construa um gráfico com os valores da tabela, colocando a pressão (p) em ordenadas e a temperatura absoluta (T) em abscissas.

Solução:
a) Analisando a tabela, percebe-se que se mantém constante a relação entre os valores da pressão (p) e os correspondentes valores da temperatura absoluta (T):

$$\frac{p}{T} = \frac{100 \cdot 10^3}{480} = \frac{75 \cdot 10^3}{360} = \frac{35{,}7 \cdot 10^3}{180} = \frac{25 \cdot 10^3}{120} = \frac{18{,}75 \cdot 10^3}{90} = \text{constante}$$

Portanto, o gás está sofrendo uma transformação isocórica ou isométrica, isto é, o volume permanece constante.

b) Colocando os valores da tabela no diagrama $p \times T$, obtemos uma reta cujo prolongamento passa pela origem (ponto que corresponde ao zero absoluto), como representado abaixo.

Respostas: a) Transformação isocórica; b) (gráfico).

R. 43 O gráfico representa uma transformação isotérmica de certa quantidade de gás ideal e três estados intermediários A, B e C dessa massa gasosa.
Usando os dados apresentados, determine a pressão correspondente ao estado B e o volume correspondente ao estado C.

Solução:
Tratando-se de uma transformação isotérmica, vale a lei de Boyle, isto é, o produto da pressão p pelo volume V permanece constante durante o processo. Então:

$$p_A V_A = p_B V_B$$

Substituindo os valores dados no gráfico ($p_A = 4{,}0$ atm, $V_A = 0{,}10$ m^3 e $V_B = 0{,}20$ m^3), vem:

$$4{,}0 \cdot 0{,}10 = p_B \cdot 0{,}20 \Rightarrow \boxed{p_B = 2{,}0 \text{ atm}}$$

Observe que a pressão se reduz à metade do valor inicial e o volume correspondente dobra, o que se justifica pelo fato de que pressão e volume são grandezas inversamente proporcionais.
Aplicando-se novamente a lei de Boyle entre os estados A e C, teremos: $p_A V_A = p_C V_C$
A pressão em C vale: $p_C = 1{,}0$ atm. Substituindo, vem:

$$4{,}0 \cdot 0{,}10 = 1{,}0 \cdot V_C \Rightarrow \boxed{V_C = 0{,}40 \text{ m}^3}$$

Observe novamente a proporcionalidade inversa entre a pressão e o volume. Enquanto a pressão reduz-se à quarta parte do valor inicial $\left(p_C = \frac{1}{4} p_A\right)$, o volume quadruplica ($V_C = 4V_A$).

Respostas: 2,0 atm e 0,40 m^3

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 132 Calcule a variação de volume sofrida por um gás ideal que ocupa inicialmente o volume de 10 ℓ a 127 °C, quando sua temperatura se eleva isobaricamente para 327 °C.

P. 133 A tabela mostra como varia o volume *V* de certa quantidade de um gás ideal em função da temperatura absoluta *T*.

Volume (cm^3)	Temperatura (K)
10	50
15	75
30	150
40	200
90	450

a) Determine o tipo de transformação que o gás está sofrendo.
b) Trace o gráfico correspondente a essa transformação, colocando, em ordenadas, os valores do volume, e em abscissas, os valores correspondentes da temperatura absoluta.

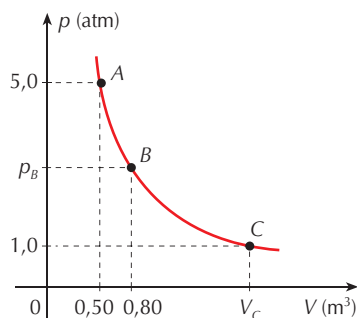
P. 134 (Faap-SP) Um recipiente que resiste até a pressão de $3,0 \cdot 10^5$ N/m^2 contém gás perfeito sob pressão $1,0 \cdot 10^5$ N/m^2 e temperatura 27 °C. Desprezando a dilatação térmica do recipiente, calcule a máxima temperatura que o gás pode atingir.

P. 135 Num certo processo, a pressão de determinada quantidade de gás perfeito varia com a temperatura absoluta, como mostra a tabela.

Pressão (atm)	Temperatura (K)
1,0	250
3,0	750
3,5	875
4,0	1.000
4,5	1.125

a) Determine o tipo de transformação que o gás está sofrendo.
b) Trace o gráfico correspondente a essa transformação, colocando, em ordenadas, os valores da pressão, e em abscissas, os valores correspondentes da temperatura absoluta.

P. 136 Sob pressão de 5 atm e à temperatura de 0 °C, um gás ideal ocupa um volume de 45 ℓ. Determine sob que pressão o gás ocupará o volume de 30 ℓ, se for mantida constante a temperatura.

P. 137 O gráfico representa a isoterma de certa massa de um gás ideal que sofre uma transformação a temperatura constante.

Com base nos valores informados no gráfico, determine a pressão correspondente ao estado *B* e o volume correspondente ao estado *C*.

Seção 8.2

Conceito de mol. Número de Avogadro

Objetivos

- Compreender a definição de mol.
- Conceituar massa molar de uma substância.

Termos e conceitos

- número de Avogadro
- número de mols

Em Química, o termo **mol** é definido como a quantidade de matéria que contém um número invariável de partículas (átomos, moléculas, elétrons ou íons). Esse número invariável de partículas é a **constante de Avogadro** ou **número de Avogadro***, uma das mais importantes constantes da Física e da Química. Seu valor aproximado é:

$$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \quad ^{**}$$

Portanto, **1 mol de um gás é um conjunto de $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas** desse gás. Assim, 1 mol de oxigênio (O_2) encerra $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas de oxigênio; 1 mol de hidrogênio (H_2) é constituído por $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas de hidrogênio.

É importante notar que 1 mol de oxigênio (O_2) não tem a mesma massa que 1 mol de hidrogênio (H_2), do mesmo modo que uma dúzia de bolinhas de chumbo não tem a mesma massa que uma dúzia de bolinhas de isopor. De fato, cada molécula de oxigênio tem maior massa que cada molécula de hidrogênio; logo, $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas de oxigênio (1 mol de oxigênio) têm maior massa que $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas de hidrogênio (1 mol de hidrogênio).

O **número de mols** (plural de mol) n contido em certa massa m (em gramas, como é usual neste estudo) da substância pode ser obtido por regra de três simples e direta:

$$\left.\begin{array}{lcl} 1 \text{ mol} & \text{———} & \text{massa de 1 mol} \\ n \text{ mols} & \text{———} & m \end{array}\right\} \Rightarrow n = \frac{m}{\text{massa de 1 mol}}$$

A massa de 1 mol de moléculas em gramas, isto é, a massa de $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas da substância é denominada **massa molar** da substância e é representada por M. Assim, a fórmula anterior é usualmente escrita como segue:

$$n = \frac{m}{M}$$

Por exemplo, a massa molar do oxigênio (O_2) vale $M = 32$ g/mol; logo, na massa $m = 96$ g de oxigênio há o seguinte número de mols:

$$n = \frac{96 \text{ g}}{32 \text{ g/mol}} = 3 \text{ mol}$$

Amostras contendo 46 g de álcool etílico e 18 g de água, que correspondem a 1 mol de cada uma dessas substâncias.

* **AVOGADRO**, Amedeo (1776-1856), advogado e físico italiano, é o fundador da moderna teoria atômico-molecular. Ocupou-se ainda da Eletroquímica e da Físico-Química. O valor de suas obras só foi reconhecido postumamente.

** O valor mais exato da constante de Avogadro, segundo medições realizadas em 2002, é $N_A = 6{,}02214199 \cdot 10^{23}$.

Equação de Clapeyron

Objetivos

- Conhecer a equação de Clapeyron.
- Verificar que o valor da constante universal dos gases perfeitos depende das unidades utilizadas.
- Analisar a lei geral dos gases perfeitos e aplicá-la para obter as fórmulas das transformações isocórica, isobárica e isotérmica.

Termos e conceitos

- CNTP
- TPN

As variáveis de estado de um gás ideal (p, V e T) estão relacionadas com a quantidade de gás. O físico francês Clapeyron estabeleceu que o quociente $\frac{pV}{T}$ é diretamente proporcional ao número n de mols de um gás ideal.

Para indicar que $\frac{pV}{T}$ é proporcional a n, escreve-se $\frac{pV}{T} = Rn$, sendo R uma constante de proporcionalidade, igual para todos os gases. Assim, R não é uma constante característica de um gás, mas uma constante universal — chamada de **constante universal dos gases perfeitos**. Seu valor depende unicamente das unidades das variáveis pressão, volume e temperatura.

Se a pressão está em atmosferas (atm), o volume em litros (ℓ) e a temperatura absoluta em kelvins (K), R vale:

$$R = 0{,}082\,\frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Como 1 atm = $1{,}013 \cdot 10^5$ N/m² e 1 $\ell = 10^{-3}$ m³, a constante R no Sistema Internacional de Unidades (SI) é expressa em relação à unidade de energia (joule):

$$R = 0{,}082 \cdot \frac{1{,}013 \cdot 10^5\ \text{N/m}^2 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 8{,}31\ \text{J/mol} \cdot \text{K}$$

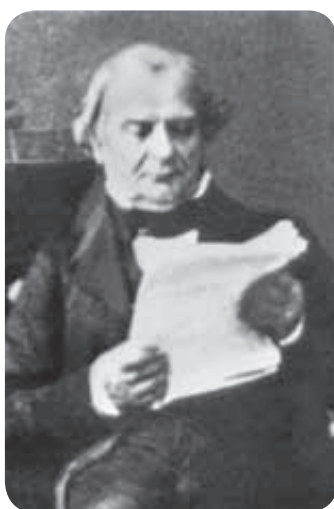
Retomando a fórmula proposta por Clapeyron, temos:

$$\frac{pV}{T} = Rn \Rightarrow pV = nRT$$

Essa fórmula é conhecida como **equação de Clapeyron**, sendo válida para os gases ideais ou perfeitos.

Como o número n de mols é $n = \frac{m}{M}$, em que m é a massa do gás e M sua massa molar, a equação de Clapeyron também pode ser escrita da seguinte maneira:

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

Nessas fórmulas, a temperatura T é sempre expressa em kelvin (K).

Paul-Émile Clapeyron (1799-1864), físico e engenheiro francês. São notáveis seus trabalhos no campo da Termodinâmica.

Lei geral dos gases perfeitos

Consideremos dois estados distintos de uma mesma massa gasosa:

Estado ①: p_1; V_1; T_1 **Estado** ②: p_2; V_2; T_2

Aplicando a equação de Clapeyron aos dois estados:

$$p_1V_1 = nRT_1 \quad ① \qquad p_2V_2 = nRT_2 \quad ②$$

Dividindo membro a membro as equações ① e ②, temos:

$$\frac{p_1V_1}{p_2V_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \boxed{\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}}$$

Essa é a representação algébrica da **lei geral dos gases perfeitos**, relacionando dois estados quaisquer de uma dada massa de um gás.

Observe que, da lei geral dos gases perfeitos, podemos chegar às fórmulas das transformações isobárica, isocórica e isotérmica que originalmente foram obtidas por meio de experiências.

- Se $V_1 = V_2$ (transformação isocórica): $\boxed{\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}}$

- Se $p_1 = p_2$ (transformação isobárica): $\boxed{\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}}$

- Se $T_1 = T_2$ (transformação isotérmica): $\boxed{p_1V_1 = p_2V_2}$

Diz-se que um gás está em condições normais de pressão e temperatura (CNPT), ou a temperatura e pressão normais (TPN), quando esse gás se encontra sob pressão de 1 atm e à temperatura de 0 °C.

CONDIÇÕES NORMAIS DE PRESSÃO E TEMPERATURA (CNPT)

Temperatura: 0 °C = 273 K

Pressão: 1 atm ≃ 10^5 N/m²

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
Atividade experimental: *Realizando uma transformação gasosa*

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 44 Um mol de certo gás ideal exerce a pressão de 1 atm a 0 °C (273 K). Sendo a constante universal dos gases perfeitos $R = 0{,}082\ \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$, determine o volume ocupado por esse gás.

Solução:

São dados: $p = 1$ atm; $n = 1$ mol; $R = 0{,}082\ \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$; $T = 273$ K. Substituindo esses valores na equação de Clapeyron, vem:

$$pV = nRT \Rightarrow 1 \cdot V = 1 \cdot 0{,}082 \cdot 273 \Rightarrow \boxed{V = 22{,}4\ \ell}$$

Resposta: 22,4 litros

Observação:
O resultado obtido é o volume ocupado por um mol do gás, isto é, por $6{,}02 \cdot 10^{23}$ moléculas, sendo denominado **volume molar**. Seu valor é independente da natureza do gás, dependendo somente das condições de pressão e temperatura em que o gás se encontra. O valor encontrado no exercício (22,4 ℓ) é o volume molar nas condições normais de pressão e temperatura (1 atm; 0 °C).

R. 45 Certa massa de um gás ideal ocupa o volume de 49,2 ℓ sob pressão de 3 atm e temperatura de 27 °C. A constante universal dos gases perfeitos vale $R = 0{,}082\ \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$.

Determine:

a) o número n de mols do gás;

b) a massa do gás, sendo a massa molar $M = 28$ g/mol;

c) o volume de um mol (volume molar) desse gás nas condições de pressão e temperatura consideradas.

Solução:

a) São dados: $p = 3$ atm; $V = 49{,}2\ \ell$; $R = 0{,}082\ \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$; $T = 27 + 273 \Rightarrow T = 300$ K

Substituindo esses valores na equação de Clapeyron, $pV = nRT$, obtemos:

$$3 \cdot 49{,}2 = n \cdot 0{,}082 \cdot 300 \Rightarrow n = \frac{147{,}6}{24{,}6} \Rightarrow \boxed{n = 6 \text{ mols}}$$

b) O número de mols pode ser expresso por $n = \frac{m}{M}$; portanto, $m = nM$. Sendo $n = 6$ mols e $M = 28$ g/mol, vem:

$$m = 6 \cdot 28 \Rightarrow \boxed{m = 168 \text{ g}}$$

c) Para o cálculo do volume molar, aplicamos a equação de Clapeyron, $pV = nRT$, para encontrar o volume de gás correspondente a $n = 1$ mol, com $R = 0{,}082\ \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ e $T = 300$ K, vem:

$$3 \cdot V = 1 \cdot 0{,}082 \cdot 300 \Rightarrow \boxed{V = 8{,}2\ \ell}$$

Portanto, esse valor (8,2 ℓ) representa o volume molar do gás sob pressão de 3 atm e à temperatura de 300 K,diferente, portanto, do volume molar nas condições normais de pressão e temperatura (22,4 ℓ).

Respostas: a) 6 mols; b) 168 g; c) 8,2 litros

R. 46 Certa massa de gás ideal exerce pressão de 3,0 atm quando confinado a um recipiente de volume 3,0 ℓ à temperatura de 27 °C. Determine:

a) a pressão que exercerá essa mesma massa quando colocada num recipiente de volume 3,5 ℓ e à temperatura de 177 °C;

b) o volume que deveria ter o recipiente para que a pressão dessa mesma massa gasosa fosse 2,0 atm à temperatura de −23 °C.

Solução:

a) O estado inicial da massa gasosa corresponde aos seguintes valores para as variáveis de estado:

$$p_1 = 3{,}0 \text{ atm};\ V_1 = 3{,}0\ \ell;\ T_1 = 27 + 273 \Rightarrow T_1 = 300 \text{ K}$$

No estado final, temos: $V_2 = 3{,}5\ \ell$; $T_2 = 177 + 273 \Rightarrow T_2 = 450$ K
Aplicando a lei geral dos gases perfeitos:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{3{,}0 \cdot 3{,}0}{300} = \frac{p_2 \cdot 3{,}5}{450} \Rightarrow \boxed{p_2 = 3{,}86 \text{ atm}}$$

b) O estado final, nesse caso, corresponde a $p_3 = 2{,}0$ atm e $T_3 = -23 + 273$, isto é, $T_3 = 250$ K.
Substituindo esses valores na lei geral dos gases perfeitos, obtemos:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_3V_3}{T_3} \Rightarrow \frac{3{,}0 \cdot 3{,}0}{300} = \frac{2{,}0 \cdot V_3}{250} \Rightarrow \boxed{V_3 = 3{,}75\ \ell}$$

Respostas: a) 3,86 atm; b) 3,75 litros

R. 47 Certa massa de gás ideal, sob pressão de 3 atm, ocupa o volume de 20 ℓ à temperatura de 27 °C (300 K). Determine:
a) o volume ocupado pelo gás a 127 °C, sob pressão de 6 atm;
b) a pressão que o gás exerce a 27 °C, quando ocupa o volume de 40 litros;
c) em que temperatura o volume de 40 ℓ do gás exerce a pressão de 5 atm.

Solução:

a) De acordo com a lei geral dos gases perfeitos: $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$

Temos: $V_1 = 20\ \ell$; $p_1 = 3$ atm; $T_1 = 300$ K; $p_2 = 6$ atm; $T_2 = 127 + 273 \Rightarrow T = 400$ K
Com esses valores, obtemos:

$$\frac{3 \cdot 20}{300} = \frac{6 \cdot V_2}{400} \Rightarrow V_2 = \frac{80}{6} \Rightarrow \boxed{V_2 \simeq 13{,}3\ \ell}$$

b) A temperatura é a mesma, relativamente às condições iniciais: $T_1 = T_2 = 300$ K

De $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$, vem: $p_1V_1 = p_2V_2$ (lei de Boyle).

Sendo $V_1 = 20\ \ell$, $p_1 = 3$ atm e $V_2 = 40\ \ell$, obtemos:

$$3 \cdot 20 = p_2 \cdot 40 \Rightarrow p_2 = \frac{60}{40} \Rightarrow \boxed{p_2 = 1{,}5 \text{ atm}}$$

c) Temos: $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$

Dados: $V_1 = 20\ \ell$; $p_1 = 3$ atm; $T_1 = 300$ K; $V_2 = 40\ \ell$; $p_2 = 5$ atm
Substituindo esses valores na fórmula acima, obtemos:

$$\frac{3 \cdot 20}{300} = \frac{5 \cdot 40}{T_2} \Rightarrow T_2 = \frac{3.000}{3} \Rightarrow \boxed{T_2 = 1.000 \text{ K}}$$

Respostas: a) 13,3 litros; b) 1,5 atm; c) 1.000 K

R. 48 Um recipiente indilatável contém 6,0 mols de um gás perfeito à temperatura de 227 °C. Um manômetro acoplado ao recipiente acusa certa pressão. Determine o número de mols do gás que deve escapar para que o manômetro não acuse variação de pressão quando o sistema for aquecido até a temperatura de 327 °C.

Solução:
De uma situação para outra não se alteram nem pressão nem volume. Aplicando a equação de Clapeyron às duas situações, obtemos:

$$pV = n_1RT_1 \quad ① \qquad pV = n_2RT_2 \quad ②$$

Igualando ① e ②, vem:

$$n_1\cancel{R}T_1 = n_2\cancel{R}T_2 \Rightarrow n_2 = \frac{n_1T_1}{T_2}$$

Mas: $n_1 = 6{,}0$ mol; $T_1 = 227 + 273 \Rightarrow T_1 = 500$ K; $T_2 = 327 + 273 \Rightarrow T_2 = 600$ K; então:

$$n_2 = \frac{6{,}0 \cdot 500}{600} \Rightarrow n_2 = 5{,}0 \text{ mols}$$

O número de mols que escapa será dado por:

$$\Delta n = n_1 - n_2 \Rightarrow \Delta n = 6{,}0 - 5{,}0 \Rightarrow \boxed{\Delta n = 1{,}0 \text{ mol}}$$

Resposta: 1,0 mol

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 138 Sob pressão e temperatura normais (1 atm; 0 °C), o mol de um gás ideal ocupa o volume de 22,4 ℓ (volume molar a TPN). Sendo o número de Avogadro $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$, determine o número de moléculas do gás existente no volume de 112 ℓ do gás, medido nas mesmas condições de pressão e temperatura.

P. 139 Certa massa de metano, cuja massa molar é $M = 16$ g/mol, ocupa volume de 123 ℓ sob pressão de 2 atm e à temperatura de 327 °C. Sendo $R = 0{,}082 \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ a constante universal dos gases perfeitos e considerando o metano um gás ideal, determine:

a) o número n de mols do gás;
b) a massa do metano;
c) o volume molar do metano nas condições consideradas.

P. 140 (EEM-SP) Um balão é inflado com oxigênio ($M = 32$ g/mol), suposto um gás ideal, ficando com volume $V = 2{,}0$ ℓ e pressão $p = 1{,}5$ atm. Esse enchimento é feito à temperatura $\theta = 20$ °C. O balão arrebenta se a pressão atingir 2,0 atm. Aquecendo-se o balão, observa-se que, imediatamente antes de arrebentar, o seu volume é 3,0 ℓ $\left(\text{dado: } R = 0{,}082 \frac{\text{atm} \cdot \ell}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)$.

a) Calcule a temperatura em que ocorre o arrebentamento.
b) Calcule a massa de oxigênio que foi colocada no balão.

P. 141 Certa massa de gás perfeito, a 30 °C de temperatura, está contida em um cilindro de 1.000 cm^3. Se a pressão inicial de 10 N/m^2 mudar para 50 N/m^2, ao mesmo tempo que o volume é reduzido para 500 cm^3, qual será sua temperatura em graus Celsius no final do processo?

P. 142 (Fuvest-SP) Uma certa massa de gás ideal, inicialmente à pressão p_0, volume V_0 e temperatura T_0, é submetida à seguinte sequência de transformações:

I. É aquecida a pressão constante até que a temperatura atinja o valor $2T_0$.
II. É resfriada a volume constante até que a temperatura atinja o valor inicial T_0.
III. É comprimida a temperatura constante até que atinja a pressão inicial p_0.

a) Calcule os valores da pressão, temperatura e volume no final de cada transformação.
b) Represente as transformações num diagrama pressão *versus* volume.

P. 143 (Vunesp) Ar do ambiente a 27 °C entra em um secador de cabelos (aquecedor de ar) e dele sai a 57 °C, voltando para o ambiente. Qual é a razão entre o volume de uma certa massa de ar quando sai do secador e o volume dessa mesma massa quando entrou no secador? Suponha que o ar se comporte como um gás ideal.

P. 144 (FEI-SP) Um reservatório contém 15 kg de gás perfeito à pressão $p_1 = 3{,}0$ atm. Sangra-se o reservatório e a pressão do gás cai para $p_2 = 2{,}8$ atm. Supondo que a temperatura não varie, qual é a massa Δm de gás retirada do reservatório?

P. 145 (Fuvest-SP) Um cilindro metálico, fechado com tampa, contém 6,0 mols de ar à pressão de 4,0 atm e à temperatura ambiente. Abre-se a tampa do cilindro. Depois de seu conteúdo ter entrado em equilíbrio termodinâmico com o ambiente, qual é o número de mols que permanecerão no cilindro? (A pressão atmosférica é 1,0 atm e o ar é admitido como sendo gás ideal.)

Seção 8.4

Teoria cinética dos gases

Objetivos

- Conhecer as hipóteses da teoria cinética a respeito do modelo de um gás ideal ou perfeito.
- Verificar em que condições o comportamento de um gás real se aproxima do modelo de um gás ideal.
- Explicar as principais propriedades macroscópicas de um gás a partir do modelo microscópico.
- Conhecer as relações entre as grandezas associadas à pressão, à energia cinética e à velocidade das moléculas em um gás perfeito.

Termos e conceitos

- **angströns**
- **colisões perfeitamente elásticas**

As moléculas constituintes de um gás estão em movimento desordenado, denominado **agitação térmica**. A partir dessa noção de movimento molecular, propõe-se a teoria cinética dos gases. Nessa teoria, apresenta-se um **modelo microscópico** para o gás ideal que explica seu comportamento global (por exemplo, as leis de Boyle e de Charles).

Na teoria cinética dos gases, aceita-se o pressuposto de que as leis da Mecânica são aplicáveis ao movimento molecular e supõem-se as seguintes hipóteses em sua aplicação:

1ª hipótese: **As moléculas se encontram em movimento desordenado, regido pelos princípios fundamentais da Mecânica newtoniana.**

Embora as velocidades das moléculas sejam variáveis, estabelecemos uma velocidade média. No oxigênio, a TPN, essa velocidade vale 460 m/s, superior à do som no ar (340 m/s).

2ª hipótese: **As moléculas não exercem força umas sobre as outras, exceto quando colidem.**

Desse modo, entre as colisões, elas realizam movimento retilíneo e uniforme.

3ª hipótese: **As colisões das moléculas entre si e contra as paredes do recipiente que as contém são perfeitamente elásticas e de duração desprezível.**

Sendo assim, há conservação da energia cinética e da quantidade de movimento.

4ª hipótese: **As moléculas têm dimensões desprezíveis em comparação aos espaços vazios entre elas.**

Considera-se, portanto, que o volume do gás é o volume do espaço entre as moléculas, que corresponde ao volume do recipiente onde o gás se encontra.

Para entender o alcance dessa hipótese, consideremos o exemplo seguinte (**fig. 9**). Uma molécula de hélio tem diâmetro da ordem de 2,2 angströns, enquanto a distância média entre duas moléculas, em temperatura e pressão normais (TPN), é da ordem de 33 angströns, isto é, quinze vezes maior. Portanto, cada molécula tem volume disponível de aproximadamente 36.000 angströns cúbicos.

Essas hipóteses sugerem o modelo microscópico de um gás (**fig. 10**), entendido como um grande espaço vazio, com moléculas movendo-se ao acaso, como abelhas furiosas numa sala fechada.

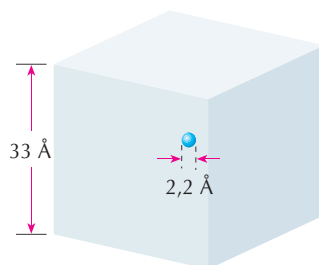



Figura 9. Comparação entre o diâmetro de uma molécula de hélio e o volume disponível, a TPN.

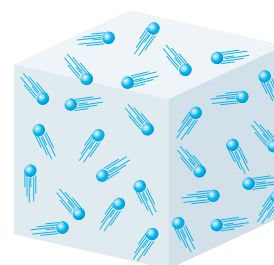



Figura 10. Modelo microscópico de um gás: um grande espaço vazio onde moléculas se movem ao acaso.

Uma molécula colide bilhões de vezes em um segundo, mudando continuamente a direção de seu movimento. Essas colisões são regidas pelas leis básicas da Mecânica newtoniana: conservação da quantidade de movimento e conservação da energia.

O gás que se enquadra sem restrições a esse modelo é o **gás ideal** (ou **gás perfeito**).

Os **gases reais**, conforme sua natureza e as condições em que se encontram, podem se aproximar mais (ou menos) do modelo proposto.

Experimentalmente, verifica-se que o modelo se aplica melhor a gases sob **baixas pressões** e **elevadas temperaturas**. Nessas condições, as hipóteses apresentadas se aproximam mais da realidade: menor pressão significa menor número de moléculas por unidade de volume, isto é, um gás rarefeito, enquanto o aumento de temperatura eleva a velocidade média das moléculas.

O modelo microscópico fornece algumas explicações para as principais propriedades macroscópicas de um gás:

- A propriedade que um gás possui de se expandir e de se difundir através de pequenos orifícios é consequência do movimento rápido de suas moléculas.
- Os gases são facilmente compressíveis porque a distância entre as moléculas pode ser diminuída sem que elas se deformem.
- Um gás mistura-se rapidamente com outro porque as moléculas de um gás ocupam os espaços vazios entre as moléculas do outro.
- Os gases têm baixa densidade porque seu volume consiste, praticamente, de espaços vazios.

Figura 11. **A pressão de um gás é o resultado dos choques das moléculas contra as paredes do recipiente que o contém.**

As leis dos gases perfeitos também podem ser explicadas pela teoria cinética. Assim, a pressão de um gás é o resultado das colisões de bilhões e bilhões de moléculas contra as paredes do recipiente que o contém (**fig. 11**).

Quando um gás é comprimido a temperatura constante, o número de choques das moléculas contra cada centímetro quadrado das paredes do recipiente, a cada segundo, torna-se maior; desse modo, a pressão aumenta (**fig. 12A**). Ao contrário, quando um gás é expandido a temperatura constante, cada centímetro quadrado da superfície é bombardeado, a cada segundo, por menor número de moléculas; logo, a pressão diminui (**fig. 12B**).

Figura 12. **A lei de Boyle: em temperatura constante, a pressão aumenta quando o volume diminui (A), e a pressão diminui quando o volume aumenta (B).**

Essas conclusões constituem a relação básica da lei de Boyle: a pressão e o volume são grandezas inversamente proporcionais quando a temperatura se mantém constante.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *A agitação térmica molecular*

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.fsc.ufsc.br/~ccf/parcerias/ntnujava/gas2D/gas2D.html (em inglês, acesso em julho/2009), você poderá visualizar o movimento browniano (explicado por Einstein, relacionando-o com a agitação térmica molecular) e, usando a simulação proposta, verificar a consequência do aumento ou da diminuição da velocidade das moléculas gasosas.

Pressão, temperatura absoluta e energia cinética de um gás

Pressão exercida por um gás perfeito

Considere um recipiente cúbico de aresta L contendo N moléculas de um gás perfeito (**fig. 13**). Podemos supor que, em média, o efeito produzido pelo movimento das moléculas seria o mesmo se cada terça parte delas se movesse em cada uma das três direções (Ox, Oy e Oz).

Figura 13.

Sejam m_0 a massa de cada molécula e v o módulo de sua velocidade média. Considere uma molécula que se move na direção Ox. Ao colidir elasticamente com a face A_1, a molécula retorna, sofrendo uma variação de quantidade de movimento igual a: $2m_0v$.

Entre dois choques consecutivos contra a mesma face A_1, a partícula percorre a distância $2L$ (vai até a face A_2, colide com esta e volta). O intervalo de tempo entre esses dois choques consecutivos vale: $\frac{2L}{v}$.

O número de vezes que a molécula colide com A_1, em cada unidade de tempo, é: $\frac{v}{2L}$.

A variação da quantidade de movimento transmitida à face A_1 pela molécula, na unidade de tempo, é dada por:

$$\frac{v}{2L} \cdot 2m_0v = \frac{m_0v^2}{L}$$

Considerando-se que na face A_1 age, em média, $\frac{1}{3}$ do número total N de moléculas, a variação total da quantidade de movimento transmitida à face A_1, na unidade de tempo, é:

$$\frac{N}{3} \cdot \frac{m_0v^2}{L}$$

Pelo teorema do impulso (Volume 1, p. 329), resulta que a força média sobre a face A_1 tem intensidade:

$$F = \frac{N}{3} \cdot \frac{m_0v^2}{L}$$

Assim, a pressão do gás sobre a face A_1 é:

$$p = \frac{F}{L^2} \Rightarrow p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m_0v^2}{L^3}$$

Sendo $V = L^3$ o volume do gás e $m = N \cdot m_0$ sua massa, vem:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{V} \cdot v^2$$

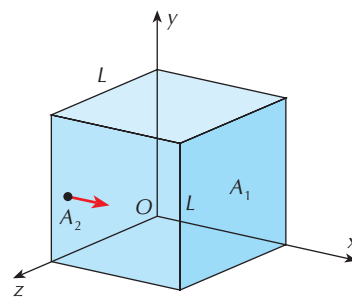
Vale ressaltar que essa dedução foi extremamente simplificada, evitando-se com isso penetrar no complexo campo do cálculo estatístico.

Energia cinética do gás

A energia cinética do gás é a soma das energias cinéticas de suas moléculas e é dada por: $E_c = \frac{mv^2}{2}$. Sendo $p = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{V} \cdot v^2$, resulta: $E_c = \frac{3}{2}pV$. Pela equação de Clapeyron, vem:

$$E_c = \frac{3}{2}nRT$$

Nessa fórmula, n é o número de mols e R é a constante universal dos gases perfeitos.

Desse modo, a energia cinética de um gás é diretamente proporcional à sua temperatura absoluta.

Velocidade média das moléculas

Partindo de $E_c = \frac{3}{2} nRT$, obtemos: $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT \Rightarrow$ $v^2 = \frac{3RT}{M}$

Essa fórmula mostra que a velocidade média das moléculas de um gás depende da natureza específica do gás, traduzida pela massa molar M.

Para um dado gás, a temperatura depende exclusivamente da velocidade das moléculas e vice-versa. Assim se justifica o fato de que **a temperatura é uma medida do grau de agitação das partículas**.

Energia cinética média por molécula

Sendo N o número de moléculas e E_c a energia cinética do gás, a energia cinética média por molécula e_c é dada por:

$$e_c = \frac{E_c}{N} \Rightarrow e_c = \frac{3nRT}{2N}$$

Como $n = \frac{N}{N_A}$ (sendo N_A o número de Avogadro), resulta: $\frac{n}{N} = \frac{1}{N_A}$; portanto:

$$e_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{N_A} \cdot T$$

O quociente $\frac{R}{N_A} = k$ é denominado **constante de Boltzmann** e vale, no Sistema Internacional de Unidades (SI):

$$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{J/K}$$

Sendo assim, podemos escrever: $e_c = \frac{3}{2} kT$

Dessa fórmula, podemos concluir que:

Em um gás, a energia cinética média por molécula não depende da natureza específica do gás.

Portanto, gases diferentes à mesma temperatura possuem igual energia cinética média por molécula.

As equações anteriores — da velocidade média e da energia cinética média das moléculas de um gás — mostram que a menor temperatura que tem significado físico corresponde à anulação da velocidade média ($v = 0$) e da energia cinética média ($e_c = 0$) das moléculas. Essa temperatura é o **zero absoluto** ($-273{,}15$ °C $= 0$ K). Em laboratórios especializados já se conseguiu atingir a incrível temperatura de 0,000000000450 K ($450 \cdot 10^{-12}$ K $= 450$ pK).

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.schulphysik.de/suren/Applets.html (em inglês, entre em "Applet Menu" e clique nos botões "Heat" e "Molecular Motion", acesso em julho/2009) você pode analisar o movimento das moléculas de um gás, em simulações que permitem visualizar como muda a agitação molecular pela variação da temperatura, do volume, do número de moléculas e da massa de cada molécula.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 146 Certa massa de gás ideal é resfriada de 427 °C para 327 °C. Determine a relação entre a energia cinética média por molécula no estado inicial e no estado final.

P. 147 Determine a energia cinética média de uma molécula gasosa a 57 °C, sendo a constante de Boltzmann (k) igual a $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

P. 148 (UFRN) Um gás ideal contido num recipiente sofre uma mudança na temperatura de 300 K para 1.200 K. Qual é a razão entre as velocidades das moléculas desse gás $\frac{v_{300}}{v_{1.200}}$?

P. 149 O hidrogênio tem massa molar $M_1 = 2$ g/mol e o oxigênio tem massa molar $M_2 = 32$ g/mol. Sendo e_1 e e_2 as energias cinéticas médias por molécula do hidrogênio e do oxigênio, e v_1 e v_2 as correspondentes velocidades médias por molécula à temperatura de 27 °C, determine o valor das relações:

a) $\frac{e_1}{e_2}$ b) $\frac{v_1}{v_2}$

Considere que o hidrogênio e o oxigênio se comportam como gases ideais.

P. 150 Retomando o exercício anterior, considere que a temperatura de ambos os gases se altera para 127 °C. Determine agora o valor das duas relações.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 151 (Unifesp) A figura reproduz o esquema da montagem feita por Robert Boyle para estabelecer a lei dos gases para transformações isotérmicas. Boyle colocou no tubo uma certa quantidade de mercúrio, até aprisionar um determinado volume de ar no ramo fechado, e igualou os níveis dos dois ramos. Em seguida, passou a acrescentar mais mercúrio no ramo aberto e a medir, no outro ramo, o volume do ar aprisionado (em unidades arbitrárias) e a correspondente pressão pelo desnível da coluna de mercúrio, em polegadas de mercúrio. Na tabela, estão alguns dos dados por ele obtidos, de acordo com a sua publicação *New Experiments Physico-Mechanical — Touching the Spring of Air and its Effects*, de 1662.

Volume (unidade arbitrária)	48	40	32	24	16	12
Pressão (polegadas de mercúrio)	$29\frac{2}{16}$	$35\frac{5}{16}$	$44\frac{3}{16}$	$58\frac{13}{16}$	$87\frac{14}{16}$	$117\frac{9}{16}$
$p \times V$	1.398	1.413	1.414	1.412	1.406	1.411

Fonte: http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/history/boyle.html (acesso em julho/2009)

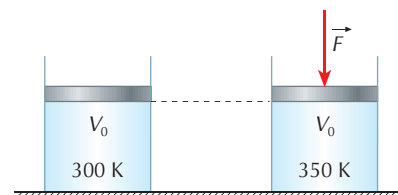
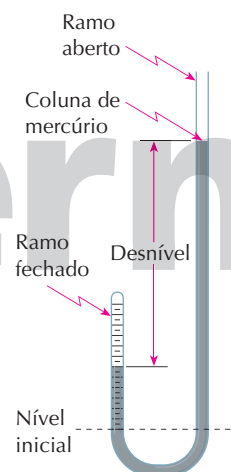
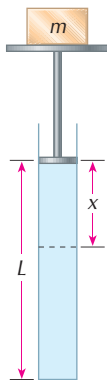
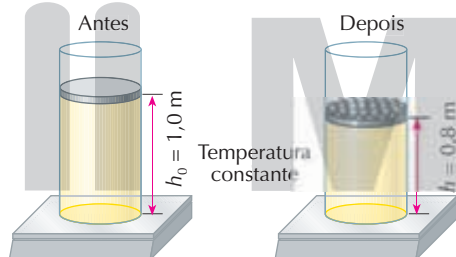
a) Todos os resultados obtidos por Boyle, com uma pequena aproximação, confirmaram a sua lei. Que resultados foram esses? Justifique.

b) De acordo com os dados da tabela, qual é a pressão, em pascal, do ar aprisionado no tubo para o volume de 24 unidades arbitrárias?

(Utilize para o cálculo: $p_{atm} = 1{,}0 \times 10^5$ pascal; $d_{Hg} = 14 \times 10^3$ kg/m³; $g = 10$ m/s²; $58\frac{13}{16}$ pol $= 1{,}5$ m)

P. 152 (Vunesp) Um cilindro reto, contendo gás ideal à temperatura de 300 K, é vedado por um êmbolo pesado que pode deslizar livremente. O volume ocupado pelo gás é V_0 e a pressão exercida sobre ele pelo peso do êmbolo e da coluna de ar acima dele é igual a 12 N/cm². Quando a temperatura passa para 350 K, o gás expande-se e seu volume aumenta. Para que ele volte ao seu valor original, V_0, mantendo a temperatura de 350 K, aplica-se sobre o êmbolo uma força adicional $\vec{F}$, vertical, como mostra a figura.

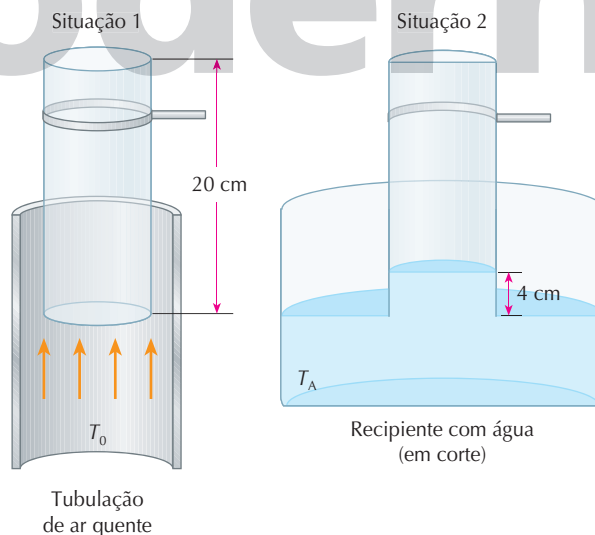
a) Calcule a pressão do gás na situação final, isto é, quando está à temperatura de 350 K, ocupando o volume V_0.

b) Sabendo que o pistão tem área de 225 cm², calcule o valor da força adicional $\vec{F}$ que faz o volume ocupado pelo gás voltar ao seu valor original.

P. 153 (UFRJ) Um gás ideal em equilíbrio termodinâmico está armazenado em um tubo cilíndrico fino de altura $L = 10{,}0$ cm e área transversal $A = 1{,}0$ cm^2, provido de um êmbolo móvel perfeitamente ajustado às paredes do tubo. Suponha que a massa do conjunto móvel composto por êmbolo, haste e suporte seja desprezível e, portanto, a pressão no interior do tubo seja inicialmente igual à pressão atmosférica $p_{atm} = 1{,}0 \times 10^5$ N/m^2. Uma massa $m = 0{,}50$ kg é então colocada sobre o suporte (veja a figura). Sob ação do peso da massa m, o êmbolo desce uma altura x, e o gás volta a atingir o equilíbrio termodinâmico com a mesma temperatura do estado inicial. Suponha que a aceleração da gravidade seja $g = 10$ m/s^2. Calcule o valor de x.

P. 154 (UFPE) Um cilindro de 20 cm^2 de seção reta contém um gás ideal comprimido em seu interior por um pistão móvel, de massa desprezível e sem atrito. O pistão repousa a uma altura $h_0 = 1{,}0$ m. A base do cilindro está em contato com um forno, de forma que a temperatura do gás permanece constante. Bolinhas de chumbo são lentamente depositadas sobre o pistão até que ele atinja a altura $h = 80$ cm, como na figura a seguir.

Determine a massa de chumbo, em kg, que foi depositada sobre o pistão. Considere a pressão atmosférica igual a 1 atm (dados: 1 atm $= 1{,}0 \cdot 10^5$ N/m^2; $g = 10$ m/s^2).

P. 155 (Fuvest-SP) Um cilindro de oxigênio hospitalar (O_2), de 60 litros, contém, inicialmente, gás a uma pressão de 100 atm e temperatura de 300 K. Quando é utilizado para a respiração de pacientes, o gás passa por um redutor de pressão, regulado para fornecer oxigênio a 3 atm, nessa mesma temperatura, acoplado a um medidor de fluxo, que indica, para essas condições, o consumo de oxigênio em litros/minuto.
Considere o O_2 como gás ideal. Suponha a temperatura constante e igual a 300 K. Seja a constante dos gases ideais $R = 8 \times 10^{-2}$ litros · atm/K. Assim, determine:

a) o número N_0 de mols de O_2, presentes inicialmente no cilindro;
b) o número n de mols de O_2, consumidos em 30 minutos de uso, com o medidor de fluxo indicando 5 litros/minuto;
c) o intervalo de tempo t, em horas, de utilização do O_2, mantido o fluxo de 5 litros/minuto, até que a pressão interna no cilindro fique reduzida a 40 atm.

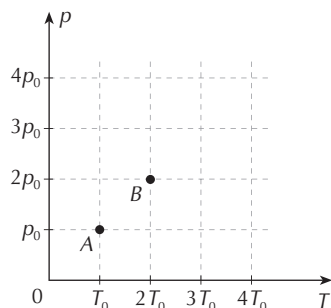
P. 156 (UFF-RJ) Até meados do século XVII, a concepção de vácuo, como uma região desprovida de matéria, era inaceitável. Contudo, experiências relacionadas à medida da pressão atmosférica possibilitaram uma nova concepção, considerando o vácuo como uma região onde a pressão é bem inferior à de sua vizinhança.
Atualmente, pode-se obter vácuo, em laboratórios, com o recurso tecnológico das bombas de vácuo.
Considere que se tenha obtido vácuo à pressão de, aproximadamente, $1{,}00 \times 10^{-10}$ atm à temperatura de 300 K. Utilizando o modelo de gás perfeito, determine o número de moléculas por cm^3 existentes nesse vácuo.
(Dados: número de Avogadro $= 6{,}02 \times 10^{23}$ moléculas/mol; constante universal dos gases $= 8{,}31$ J/mol · K; 1 atm $= 1{,}01 \times 10^5$ N/m^2.)

P. 157 (Fuvest-SP) Para medir a temperatura T_0 do ar quente expelido, em baixa velocidade, por uma tubulação, um jovem utilizou uma garrafa cilíndrica vazia, com área da base $S = 50$ cm^2 e altura $H = 20$ cm. Adaptando um suporte isolante na garrafa, ela foi suspensa sobre a tubulação por alguns minutos, para que o ar expelido ocupasse todo o seu volume e se estabelecesse o equilíbrio térmico a T_0 (situação 1). A garrafa foi, então, rapidamente colocada sobre um recipiente com água mantida à temperatura ambiente $T_A = 27$ °C. Ele observou que a água do recipiente subiu até uma altura $h = 4$ cm, dentro da garrafa, após o ar nela contido entrar em equilíbrio térmico com a água (situação 2).

Estime:

a) o volume V_A, em cm^3, do ar dentro da garrafa, após a entrada da água, na situação 2;
b) a variação de pressão Δp, em N/m^2, do ar dentro da garrafa, entre as situações 1 e 2;
c) a temperatura inicial T_0 em °C, do ar da tubulação, desprezando a variação de pressão do ar dentro da garrafa.

Adote: $PV = nRT$;
$T_K = T_C + 273$;
$d_{água} = 10^3$ kg/m^3;
$g = 10$ m/s^2.

TESTES PROPOSTOS

T. 149 (UFRGS-RS) O diagrama abaixo representa a pressão (p) em função da temperatura absoluta (T), para uma amostra de gás ideal. Os pontos A e B indicam dois estados dessa amostra.

Sendo V_A e V_B os volumes correspondentes aos estados indicados, podemos afirmar que a razão $\frac{V_B}{V_A}$ é:

a) $\frac{1}{4}$ b) $\frac{1}{2}$ c) 1 d) 2 e) 4

T. 150 (UFPB) Antes de iniciar uma viagem, um motorista cuidadoso calibra os pneus de seu carro, que estão à temperatura ambiente de 27 °C, com uma pressão de 30 lbf/pol². Ao final da viagem, para determinar a temperatura dos pneus, o motorista mede a pressão deles e descobre que esta aumentou para 32 lbf/pol². Se o volume dos pneus permanece inalterado e se o gás no interior deles é ideal, o motorista determinou a temperatura dos pneus como sendo:

a) 17 °C
b) 27 °C
c) 37 °C
d) 47 °C
e) 57 °C

T. 151 (Mackenzie-SP) Um pesquisador transferiu uma massa de gás perfeito à temperatura de 27 °C para outro recipiente de volume 20% maior. Para que a pressão do gás nesse novo recipiente seja igual à inicial, o pesquisador teve de aquecer o gás de:

a) 20 °C
b) 30 °C
c) 40 °C
d) 50 °C
e) 60 °C

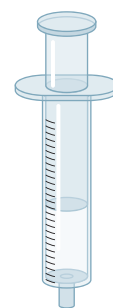
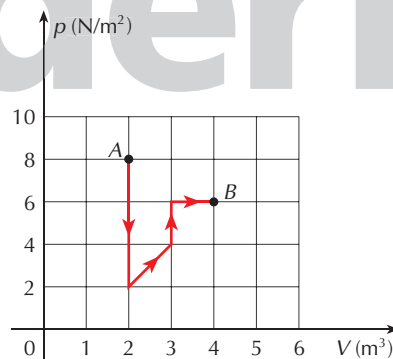
T. 152 (PUC-RJ) Uma panela fechada, contendo um gás considerado ideal, é aquecida da temperatura ambiente de 25 °C até a temperatura de 100 °C. Sabendo que a pressão inicial do gás contido na panela é P_0 e que o volume da panela permaneceu constante durante esse processo, podemos afirmar que:

a) o processo é isovolumétrico e a pressão final é aproximadamente $\frac{5P_0}{4}$.
b) o processo é isovolumétrico e a pressão final da panela é aproximadamente $\frac{P_0}{3}$.
c) o processo é isobárico e o volume da panela permanece constante.
d) o processo é isobárico e apenas a temperatura variou.
e) o processo é isovolumétrico e a pressão final da panela é aproximadamente $3P_0$.

T. 153 (Mackenzie-SP) Um estudante observa que 15 litros de determinada massa de gás perfeito, à pressão de 8 atm, sofre uma transformação isotérmica na qual seu volume aumenta de um terço. A nova pressão do gás será de:

a) 2 atm
b) 3 atm
c) 4 atm
d) 5 atm
e) 6 atm

T. 154 (UTFPR) Uma seringa de injeção tem seu bico completamente vedado e inicialmente contém o volume de 5,0 cm³ de ar sob pressão de $0{,}90 \cdot 10^5$ Pa. Suponha que a massa de ar se comporte como um gás perfeito e sofra uma transformação isotérmica quando o êmbolo for puxado, aumentando o volume interno para 20,0 cm³. Sendo assim, a pressão, em Pa, será igual a:

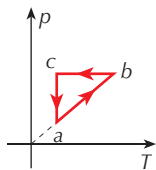
a) $0{,}30 \cdot 10^5$
b) $2{,}25 \cdot 10^4$
c) $4{,}30 \cdot 10^4$
d) $3{,}60 \cdot 10^4$
e) $1{,}00 \cdot 10^5$

T. 155 (Uece) Considere o processo, experimentado por um gás ideal, mostrado na figura.

Seja T_A a temperatura absoluta do gás no ponto A e T_B a temperatura absoluta do gás no ponto B.

Podemos afirmar, corretamente, que $\frac{T_A}{T_B}$ é igual a:

a) $\frac{4}{3}$ b) $\frac{3}{2}$ c) $\frac{3}{4}$ d) $\frac{2}{3}$

T. 156 (FMTM-MG) Ao nível do mar e sob temperatura de 27 °C, 450 ℓ de gás hélio, puro, preenchem o espaço interno de um balão (dado: 1 atm = 10^5 Pa). Admitindo-se que a parede do balão não exerce pressão significativa sobre o gás, ao se transportar o balão para um local em que ficará submetido à pressão de 39 kPa e à temperatura de −13 °C, o volume de gás hélio armazenado no balão será, em ℓ, igual a:

a) 1.000
b) 750
c) 555
d) 215
e) 130

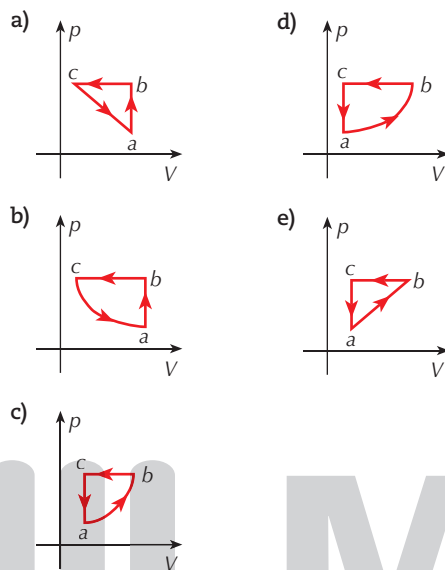
T. 157 (UFC-CE) Um gás ideal sofre o processo cíclico mostrado no diagrama $p \times T$, conforme figura abaixo. O ciclo é composto pelos processos termodinâmicos $a \rightarrow b$, $b \rightarrow c$ e $c \rightarrow a$.

Assinale entre as alternativas abaixo aquela que contém o diagrama $p \times V$ equivalente ao ciclo $p \times T$.

a)

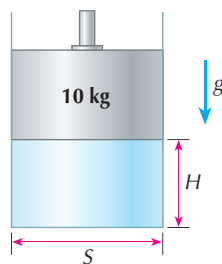
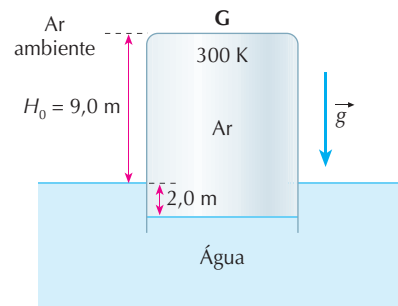
b)

c)

d)

e)

T. 158 (Fuvest-SP) Um equipamento possui um sistema formado por um pistão, com massa de 10 kg, que se movimenta, sem atrito, em um cilindro de secção transversal $S = 0{,}01\ m^2$. Operando em uma região onde a pressão atmosférica é de $10{,}0 \times 10^4$ Pa (sendo 1 Pa = 1 N/m^2), o ar aprisionado no interior do cilindro mantém o pistão a uma altura $H = 18$ cm. Quando esse sistema é levado a operar em uma região onde a pressão atmosférica é de $8{,}0 \times 10^4$ Pa, mantendo-se a mesma temperatura, a nova altura H no interior do cilindro, em centímetros, passa a ser aproximadamente de:

a) 5,5
b) 14,7
c) 20
d) 22
e) 36

(Dado: $g = 10\ m/s^2$)

T. 159 (Fuvest-SP) O gasômetro **G**, utilizado para o armazenamento de ar, é um recipiente cilíndrico, metálico, com paredes laterais de pequena espessura. **G** é fechado na sua parte superior, aberto na inferior que permanece imersa em água e pode se mover na direção vertical. **G** contém ar, inicialmente, à temperatura de 300 K e o nível da água no seu interior se encontra 2,0 m abaixo do nível externo da água. Nessas condições, a tampa de **G** está 9,0 m acima do nível externo da água, como mostra a figura.

Aquecendo-se o gás, o sistema se estabiliza numa nova altura de equilíbrio, com a tampa superior a uma altura H, em relação ao nível externo da água, e com a temperatura do gás a 360 K.
Supondo que o ar se comporte como um gás ideal, a nova altura H será, aproximadamente, igual a:

a) 8,8 m
b) 9,0 m
c) 10,8 m
d) 11,2 m
e) 13,2 m

T. 160 (UEPB) Um *freezer* foi regulado para manter a temperatura interior igual a −3,0 °C. Quando a temperatura exterior vale 27,0 °C e a pressão 1,0 atm, uma pessoa fecha a porta do *freezer* e liga-o. Após um certo tempo, ela tenta abri-lo, mas não consegue com facilidade. Isso ocorre porque:

a) a pressão no interior do *freezer* é maior que a pressão no exterior e vale 1,2 atm.
b) a pressão no interior do *freezer* é igual à pressão no exterior e vale 1,0 atm.
c) a pressão no interior do *freezer* é menor que a pressão no exterior e vale 0,5 atm.
d) a pressão no interior do *freezer* é menor que a pressão no exterior e vale 0,9 atm.
e) a pressão no interior do *freezer* é maior que a pressão no exterior e vale 1,5 atm.

T. 161 (Unifesp) Um estudante contou ao seu professor de Física que colocou uma garrafa PET vazia, fechada, no *freezer* de sua casa. Depois de algum tempo, abriu o *freezer* e verificou que a garrafa estava amassada. Na primeira versão do estudante, o volume teria se reduzido de apenas 10% do volume inicial; em uma segunda versão, a redução do volume teria sido bem maior, de 50%. Para avaliar a veracidade dessa história, o professor aplicou à situação descrita a Lei Geral dos Gases Perfeitos, fazendo as seguintes hipóteses, que admitiu verdadeiras:

- a garrafa foi bem fechada, à temperatura ambiente de 27 °C, e não houve vazamento de ar;
- a temperatura do *freezer* era de −18 °C;
- houve tempo suficiente para o equilíbrio térmico;
- a pressão interna do *freezer* tem de ser menor do que a pressão ambiente (pressão atmosférica).

Assim, o professor pôde concluir que o estudante:

a) falou a verdade na primeira versão, pois só essa redução do volume é compatível com a condição de que a pressão interna do *freezer* seja menor do que a pressão ambiente.
b) falou a verdade na segunda versão, pois só essa redução do volume é compatível com a condição de que a pressão interna do *freezer* seja menor do que a pressão ambiente.

c) mentiu nas duas versões, pois ambas implicariam uma pressão interna do *freezer* maior do que a pressão ambiente.

d) mentiu nas duas versões, pois é impossível a diminuição do volume da garrafa, qualquer que seja a relação entre a pressão interna do *freezer* e a pressão ambiente.

e) mentiu nas duas versões, pois nessas condições a garrafa teria estufado ou até mesmo explodido, tendo em vista que a pressão interna do *freezer* é muito menor do que a pressão ambiente.

T. 162 (Ufac) Tem-se $6{,}4 \cdot 10^{-2}$ kg de gás oxigênio (O_2), cuja massa molar é 32 g/mol, considerado como ideal, num volume de 10 litros, à temperatura de 27 °C (dado: constante universal dos gases perfeitos = 0,08 atm · ℓ/mol · K). A pressão exercida pelo gás é:

a) 0,48 atm
b) 0,50 atm
c) 50 atm
d) 4,8 atm
e) 48 atm

T. 163 (PUC-SP) Uma câmara de volume constante contém um mol de um gás ideal a uma pressão de 0,50 atm. Se a temperatura da câmara for mantida constante e mais dois mols do mesmo gás forem nela injetados, sua pressão final será:

a) 1,50 atm
b) 1,00 atm
c) 0,50 atm
d) 1,75 atm
e) 0,75 atm

T. 164 (Mackenzie-SP) Durante certo experimento em laboratório, utilizou-se um aquecedor de potência constante e igual a 1.000 W, durante 14 minutos. Verificou-se em seguida que, com a quantidade de energia térmica dissipada nesse tempo, se pode proporcionar o mesmo aumento de temperatura, tanto a um volume de 20,0 litros de água líquida pura, como a uma massa de gás carbônico (CO_2) igual a 22,0 mg, inicialmente à temperatura de 27 °C. Sabe-se que a massa de 1 mol de CO_2 é 44 g (dados: $R = 8{,}2 \cdot 10^{-2}\ \dfrac{\text{atm} \cdot \text{litro}}{\text{mol} \cdot \text{kelvin}}$; $c_{\text{água}} = 4{,}2$ joules/g · °C; $d_{\text{água}} = 1{,}0 \cdot 10^{3}$ g/litro).

Mantendo-se constante o volume do gás, que é de $1{,}0 \cdot 10^{-2}$ litro, sua pressão final será aproximadamente:

a) 0,150 atm
b) 1,27 atm
c) 1,50 atm
d) 1,57 atm
e) 3,00 atm

T. 165 (Fuvest-SP) Uma equipe tenta resgatar um barco naufragado que está a 90 m de profundidade. O porão do barco tem tamanho suficiente para que um balão seja inflado dentro dele, expulse parte da água e permita que o barco seja içado até uma profundidade de 10 m. O balão dispõe de uma válvula que libera o ar, à medida que o barco sobe, para manter seu volume inalterado. No início da operação, a 90 m de profundidade, são injetados 20.000 mols de ar no balão. Sabe-se que a pressão na superfície do mar é de 1 atm e que, no mar, a pressão aumenta de 1 atm a cada 10 m de profundidade. Além disso, a pressão do ar no balão é sempre igual à pressão externa da água. Ao alcançar a profundidade de 10 m, a porcentagem do ar injetado que ainda permanece no balão é:

a) 20% b) 30% c) 50% d) 80% e) 90%

T. 166 (Fuvest-SP) Um extintor de incêndio cilíndrico, contendo CO_2, possui um medidor de pressão interna que, inicialmente, indica 200 atm (dado: 1 atm = 10^5 N/m²). Com o tempo, parte do gás escapa, o extintor perde pressão e precisa ser recarregado. Considere que a temperatura permanece constante e o CO_2, nessas condições, comporta-se como gás perfeito. Quando a pressão interna for igual a 160 atm, a porcentagem da massa inicial de gás que terá escapado corresponderá a:

a) 10%
b) 20%
c) 40%
d) 60%
e) 75%

T. 167 (ITA-SP) Um recipiente continha inicialmente 10,0 kg de gás sob pressão de $10 \cdot 10^6$ N/m². Uma quantidade *m* de gás saiu do recipiente sem que a temperatura variasse. Determine *m*, sabendo que a pressão caiu para $2{,}5 \cdot 10^6$ N/m².

a) 2,5 kg
b) 5,0 kg
c) 7,5 kg
d) 4,0 kg
e) nenhuma das anteriores

T. 168 (Fuvest-SP) Um cilindro contém uma certa massa m_0 de um gás a T_0 = 7 °C (ou 280 K) e pressão p_0. Ele possui uma válvula de segurança que impede a pressão interna de alcançar valores superiores a p_0. Se essa pressão ultrapassar p_0, parte do gás é liberada para o ambiente. Ao ser aquecido até T = 77 °C (ou 350 K), a válvula do cilindro libera parte do gás, mantendo a pressão interna no valor p_0. No final do aquecimento, a massa de gás que permanece no cilindro é, aproximadamente, de:

a) $1{,}0m_0$
b) $0{,}8m_0$
c) $0{,}7m_0$
d) $0{,}5m_0$
e) $0{,}1m_0$

T. 169 (UFMS) Lord Kelvin (1824-1907) estabeleceu uma relação entre a energia de agitação das moléculas de um sistema e sua temperatura. Considere um recipiente com gás, fechado e cuja variação de volume seja desprezível. Pode-se, então, afirmar corretamente que:

01) a energia cinética das moléculas do gás não depende de sua temperatura.
02) quando a temperatura das moléculas for de 32 °F, não haverá agitação térmica das moléculas do gás.
04) o estado de agitação das moléculas do gás é o mesmo para as temperaturas de 100 °C e 100 K.
08) quando a temperatura das moléculas for o zero absoluto, a agitação térmica das moléculas deve cessar.
16) a uma temperatura de 0 °C, a energia cinética das moléculas do gás é nula.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

T. 170 (Acafe-SC) Considerando *p* a pressão, V o volume e N o número de moléculas de um certo gás ideal, a energia cinética média por molécula desse gás pode ser escrita:

a) $\dfrac{Np}{2V}$
b) $\dfrac{2pV}{3N}$
c) $\dfrac{3pN}{2V}$
d) $\dfrac{2pN}{3V}$
e) $\dfrac{3pV}{2N}$

T.171 (UEPB) No estudo dos gases criou-se um modelo teórico, denominado gás perfeito ou ideal. Vários cientistas contribuíram para este estudo, dentre eles Boyle (1627-1691), Mariotte (1620-1684), Gay-Lussac (1778-1850) e Charles (1746-1823). As situações descritas a seguir referem-se a alguns fenômenos e teorias existentes acerca do gás ideal.

- *Situação I* – Ao introduzir ar num pneu vazio, os choques das moléculas dos gases que compõem o ar com as paredes internas do pneu fazem com que ele se encha.
- *Situação II* – Dentro de um botijão existe uma determinada massa de gás a 300 K e sob pressão de 6 atm. Sendo o seu volume invariável, ao esfriá-lo até 200 K, sua pressão passa a ser de 3 atm.
- *Situação III* – Ao emborcar uma lata vazia de refrigerante, depois de aquecida, num recipiente com água fria, ela é amassada pela pressão atmosférica, devido ao aumento de pressão em seu interior, resultado do resfriamento do ar rarefeito que foi aprisionado.

Para as situações supracitadas, é (são) verdadeira(s):

a) somente II e III.
b) somente I e II.
c) somente I
d) somente I e III.
e) I, II e III.

T.172 (Fesp-PE) Numa primeira experiência, expande-se o gás contido em um recipiente, de modo a duplicar o volume, enquanto a pressão permanece constante. Numa segunda experiência, a partir das mesmas condições iniciais, duplica-se a pressão sobre o gás, enquanto o volume permanece constante. A respeito da energia cinética das moléculas do gás, pode-se afirmar que:

a) duplicou nas duas experiências.
b) duplicou na 1ª experiência e reduziu-se à metade na segunda.
c) duplicou na 2ª experiência e reduziu-se à metade na primeira.
d) permaneceu constante nas duas experiências.
e) em ambas as experiências foi multiplicada pela raiz de 2.

T.173 (UFU-MG) Considere uma amostra de hidrogênio e outra de oxigênio, ambas a uma mesma temperatura. Sabe-se que a massa molecular do hidrogênio é $3{,}3 \cdot 10^{-27}$ kg e a do oxigênio é $53 \cdot 10^{-27}$ kg. Podemos afirmar que:

a) se duplicarmos a temperatura absoluta das amostras, os valores das energias cinéticas médias das moléculas não se alteram.
b) a energia cinética das moléculas de hidrogênio é menor que a energia cinética das moléculas de oxigênio.
c) a velocidade média das moléculas de oxigênio é maior que a velocidade média das moléculas de hidrogênio.
d) a energia cinética das moléculas de hidrogênio não se anula no zero absoluto.
e) a energia cinética das moléculas de oxigênio se anula no zero absoluto.

T.174 (Uece) Um recipiente contém uma mistura gasosa, em equilíbrio termodinâmico, constituída de H_2, CO_2, NH_3 e N_2, a baixa pressão e a temperatura ambiente, comportando-se como gás ideal. Dentre as moléculas do interior deste recipiente as que têm maior velocidade são as de:

a) H_2 **b)** CO_2 **c)** NH_3 **d)** N_2

UNIDADE D

Capítulo **9**

As leis da Termodinâmica

A primeira lei da Termodinâmica é uma aplicação do princípio da conservação da energia. A segunda lei tem caráter estatístico e estabelece a forma preferencial de evolução do Universo.

9.1 Considerações preliminares

O trabalho e o calor relacionam-se com a transferência de energia entre um sistema e o meio exterior.

9.2 O princípio da conservação da energia aplicado à Termodinâmica

A primeira lei da Termodinâmica é uma reafirmação do princípio da conservação de energia e é válida para qualquer processo natural que envolva trocas energéticas.

9.3 Transformações gasosas

As transformações de um gás ideal são examinadas considerando a primeira lei da Termodinâmica.

9.4 A conversão de calor em trabalho

A segunda lei da Termodinâmica tem caráter estatístico e expressa o sentido preferencial com que os sistemas evoluem espontaneamente.

9.5 Princípio da degradação da energia

Os fenômenos naturais acontecem no sentido dos estados mais prováveis, havendo a passagem de um estado mais ordenado para um estado menos ordenado.

O funcionamento de uma máquina térmica se baseia na conversão de calor em trabalho. Para que isso aconteça, a máquina deve operar em um ciclo envolvendo duas fontes térmicas. Da fonte quente retira-se calor, convertendo uma parte em trabalho e rejeitando o restante para a fonte fria. Um exemplo desse processo é o funcionamento de uma locomotiva a vapor, na qual a fonte quente é a caldeira e a fonte fria é a atmosfera. O calor retirado da caldeira é parcialmente transformado no trabalho motor, que aciona a máquina.

Seção 9.1

Objetivos

- Compreender a relação entre calor e trabalho.
- Obter o trabalho realizado por um gás numa transformação isobárica pela definição de trabalho e pelo diagrama $p \times V$ e generalizá-lo para uma transformação qualquer.
- Analisar o trabalho realizado por um gás numa transformação isobárica.

Termos e conceitos

- trabalho interno
- trabalho externo

Considerações preliminares

A Termodinâmica é o estudo das relações entre as quantidades de calor trocadas e os trabalhos realizados num processo físico, envolvendo um corpo (ou um sistema de corpos) e o resto do Universo (que denominamos **meio exterior**). Por exemplo, um gás contido num cilindro provido de êmbolo (**fig. 1**), ao ser aquecido, age com uma força $\vec{F}$ sobre o êmbolo, deslocando-o. Assim, o sistema recebe calor (Q) do meio exterior e a força $\vec{F}$ aplicada pelo sistema realiza um trabalho $\mathcal{T}$ sobre o meio exterior.

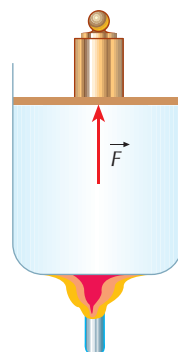



Figura 1. O gás, ao receber calor do meio exterior, realiza trabalho sobre ele.

Por condução, o **calor** se transfere de um corpo para outro ou entre partes de um corpo, em consequência de choques moleculares. Quanto maior a temperatura, maiores as velocidades das moléculas e mais frequentes os choques entre elas. Desse modo, ocorre transferência de energia cinética para as moléculas de menor velocidade, isto é, para as regiões de menor temperatura. Podemos, portanto, considerar a temperatura uma propriedade que determina o sentido em que se propaga o calor.

O **trabalho**, do mesmo modo que o calor, também se relaciona com transferência de energia. No entanto, o trabalho corresponde a **trocas energéticas sem influência de diferenças de temperatura** — e nesse aspecto se distingue do calor. O trabalho é realizado por uma força $\vec{F}$, considerando-se o sistema como um todo, independentemente do movimento de suas moléculas, e por isso não depende da temperatura.

Quando o sistema como um todo produz um deslocamento ao agir com uma força sobre o meio exterior, o trabalho realizado é denominado **trabalho externo**. No exemplo da **figura 1**, o gás, ao se expandir deslocando o êmbolo, realiza um trabalho externo sobre o meio que o envolve.

O trabalho executado por uma parte do sistema sobre outra do mesmo sistema é chamado de **trabalho interno**. Assim, as forças de interação entre as moléculas do gás realizam um trabalho interno. No estudo da Termodinâmica só consideramos o trabalho externo, que chamaremos, de agora em diante, simplesmente de **trabalho**.

Em uma usina termoelétrica, a rotação das turbinas é feita pelo vapor-d'água produzido pela queima de um combustível como, por exemplo, o carvão. Nesse caso, o vapor em expansão realiza um trabalho externo.

Trabalho numa transformação

Considere um gás contido num cilindro cujo êmbolo pode se movimentar livremente e sobre o qual há um peso de massa *m* (**fig. 2A**). Durante qualquer transformação sofrida pelo gás, a pressão se mantém constante, pois o peso colocado sobre o êmbolo não varia. Sejam p a pressão, V_1 o volume e T_1 a temperatura do gás na situação inicial.

Fornecendo calor Q ao sistema, por meio de uma fonte térmica (**fig. 2B**), o gás se expande, deslocando o êmbolo de uma distância d. Na situação final (**fig. 2C**), o volume do gás é V_2 e a temperatura é T_2, mantendo-se a pressão constante p.

O gás exerceu uma força $\vec{F}$ sobre o êmbolo, provocando sobre ele um deslocamento d e realizando um trabalho τ, dado por:

$$\tau = Fd$$

Mas: $F = pA$. Sendo p a pressão do gás e A a área do êmbolo, vem:

$$\tau = pA$$

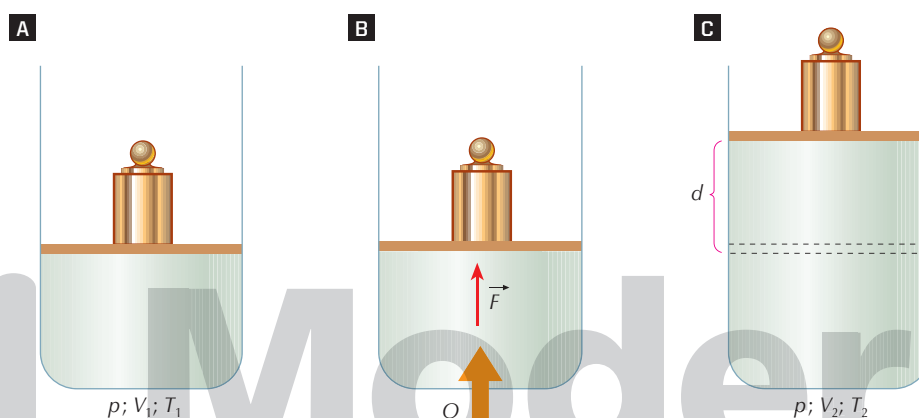



Figura 2. **O gás, inicialmente no estado p, V_1, T_1, recebe uma quantidade de calor Q (de uma chama, por exemplo) e passa para o estado p, V_2, T_2, realizando o trabalho $\tau = p \cdot (V_2 - V_1)$.**

O produto $Ad = \Delta V$ é a variação de volume ocorrida. Assim, o trabalho τ realizado pelo gás sobre o meio exterior é dado por:

$$\tau = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1)$$ (trabalho numa transformação isobárica)

O trabalho é uma grandeza algébrica e assume, no caso, o sinal da variação de volume ΔV, uma vez que a pressão p é sempre positiva.

Numa expansão, a variação de volume é positiva e, portanto, o trabalho realizado é positivo. Como o trabalho representa uma transferência de energia, o gás, ao se expandir, está perdendo energia, embora esteja também recebendo energia na forma de calor da fonte térmica.

Numa compressão, a variação de volume é negativa e, portanto, o trabalho realizado é negativo. Assim, quando um gás é comprimido, está recebendo energia do meio exterior.

$$\tau = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) \begin{cases} V_2 > V_1 \Rightarrow \Delta V > 0 \Rightarrow \tau > 0 \\ V_2 < V_1 \Rightarrow \Delta V < 0 \Rightarrow \tau < 0 \end{cases}$$

É usual dizer que, na expansão, o gás (sistema) realiza trabalho sobre o meio exterior e, na compressão, o meio exterior realiza trabalho sobre o gás.

No diagrama da pressão em função do volume (diagrama de trabalho), o produto $p \cdot \Delta V$ corresponde numericamente à área destacada na **figura 3**, compreendida entre a reta representativa da transformação e o eixo das abscissas.

Podemos generalizar essa conclusão (**fig. 4**), considerando uma transformação qualquer entre dois estados do gás. Admitamos uma série de pequenas transformações isobáricas elementares. Em cada uma delas, a área do retângulo individualizado equivale numericamente ao trabalho realizado. A soma dos vários retângulos fornece o trabalho total realizado na transformação.

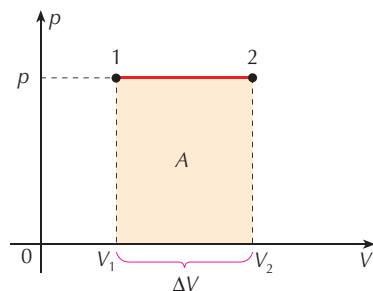



Figura 3. O trabalho realizado é dado numericamente pela área destacada: $\mathcal{T}_{12} \overset{N}{=} A$. Observe que $\mathcal{T}_{21} \overset{N}{=} -A$.

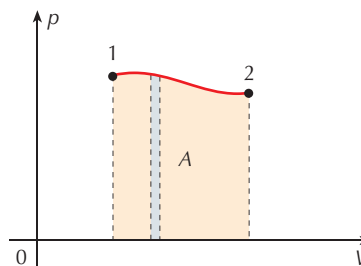



Figura 4. O trabalho realizado é dado numericamente pela área destacada, qualquer que seja a transformação entre dois estados do gás: $\mathcal{T}_{12} \overset{N}{=} A$ e $\mathcal{T}_{21} \overset{N}{=} -A$.

Entre dois estados quaisquer do gás, podemos considerar uma infinidade de processos e, portanto, uma infinidade de valores para o trabalho realizado. Sendo assim, o trabalho realizado numa transformação termodinâmica depende não só dos estados inicial e final como também dos estados intermediários, isto é, do caminho entre os estados inicial e final.

Por exemplo, entre os estados indicados por A e por B, na **figura 5**, o maior trabalho é o realizado no caminho I, e o menor, no caminho III. Então, podemos escrever:

$$\mathcal{T}_{I} > \mathcal{T}_{II} > \mathcal{T}_{III}$$

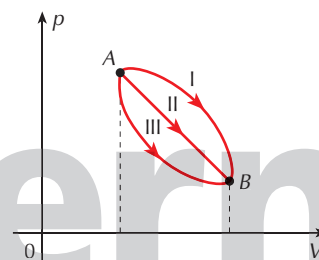
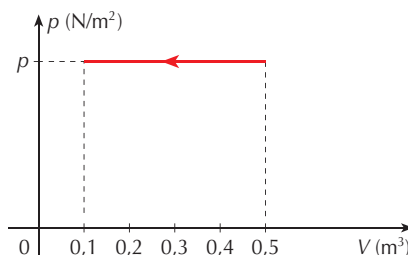



Figura 5. O trabalho realizado num processo termodinâmico depende do caminho entre os estados inicial e final.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 49 Cinco mols de um gás perfeito se encontram à temperatura de 600 K, ocupando um volume de 0,5 m^3. Mediante um processo isobárico, o gás é submetido à transformação indicada no gráfico.

a) Determine a pressão exercida pelo gás durante o processo.
b) Qual é a temperatura final do gás?
c) Calcule o trabalho realizado na transformação, indicando como esse cálculo pode ser feito por meio do gráfico.
d) O trabalho em questão é realizado pelo gás ou sobre o gás? Explique.
(Dado: R = 8,31 J/mol · K)

Solução:

a) Na equação de Clapeyron $pV = nRT$, substituímos $n = 5$, $V = 0{,}5\ m^3$, $R = 8{,}31\ J/mol \cdot K$ e $T = 600\ K$:

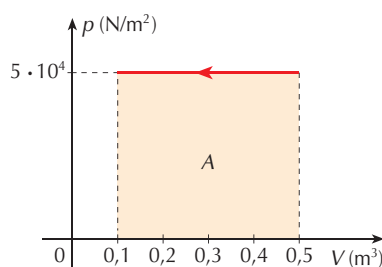
$$p \cdot 0{,}5 = 5 \cdot 8{,}31 \cdot 600 \Rightarrow \boxed{p \simeq 5 \cdot 10^4\ N/m^2}$$

b) Como o processo é isobárico, vale a lei de Charles. Sendo $V_1 = 0{,}5\ m^3$, $V_2 = 0{,}1\ m^3$ (gráfico) e $T_1 = 600\ K$, vem:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{0{,}5}{600} = \frac{0{,}1}{T_2} \Rightarrow \boxed{T_2 = 120\ K}$$

c) O trabalho pode ser calculado por: $\tau = p \cdot \Delta V$ Sendo $p = 5 \cdot 10^4\ N/m^2$ e $\Delta V = V_2 - V_1 = 0{,}1\ m^3 - 0{,}5\ m^3 = -0{,}4\ m^3$, temos:

$$\tau = 5 \cdot 10^4 \cdot (-0{,}4) \Rightarrow \boxed{\tau = -2 \cdot 10^4\ J}$$

Esse trabalho também pode ser calculado pela área do retângulo destacado no gráfico:

$$A = 5 \cdot 10^4 \cdot (0{,}5 - 0{,}1) = 2 \cdot 10^4$$

Temos $|\tau| \stackrel{N}{=} A$. O sinal negativo deve ser acrescido em razão de se tratar de uma compressão; logo:

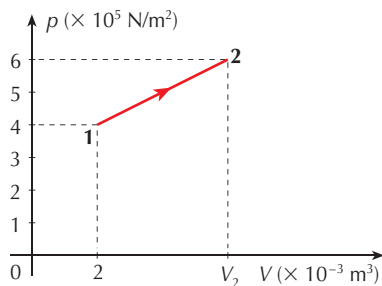
$$\tau = -2 \cdot 10^4\ J$$

d) Como o gás está sendo comprimido, isto é, seu volume está diminuindo, o trabalho é realizado **sobre o gás,** pelo meio exterior.

Respostas: a) $5 \cdot 10^4\ N/m^2$; b) 120 K; c) $-2 \cdot 10^4\ J$; d) sobre o gás.

R. 50 Certa massa de um gás ideal sofre o processo termodinâmico indicado no gráfico abaixo. Sendo $T_1 = 200\ K$ a temperatura inicial do gás no processo e $T_2 = 900\ K$ a temperatura final, calcule:

a) o volume final da massa gasosa;

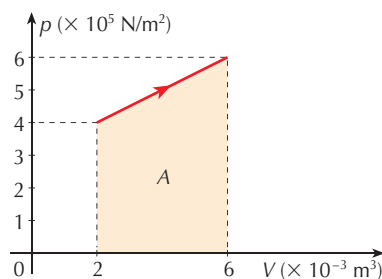
b) o trabalho realizado no processo, indicando se ele é realizado pelo gás ou sobre o gás.

Solução:

a) Como se trata de uma transformação em que se modificam as três variáveis de estado, devemos aplicar a lei geral dos gases perfeitos:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

Substituindo $p_1 = 4 \cdot 10^5\ N/m^2$, $p^2 = 6 \cdot 10^5\ N/m^2$, $T_1 = 200\ K$, $T_2 = 900\ K$ e $V_1 = 2 \cdot 10^{-3}\ m^3$, obtemos:

$$\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{200} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot V_2}{900} \Rightarrow \boxed{V_2 = 6 \cdot 10^{-3}\ m^3}$$

b) O trabalho realizado no processo é dado pela área do trapézio destacado no gráfico, que numericamente vale:

$$A = \frac{6 \cdot 10^5 + 4 \cdot 10^5}{2} \cdot (6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}) \Rightarrow A = 5 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \Rightarrow A = 20 \cdot 10^2 = 2 \cdot 10^3$$

Assim, o trabalho vale: $\boxed{\mathcal{T} = 2 \cdot 10^3 \text{ J}}$

Como se trata de uma expansão, esse trabalho é positivo, sendo realizado **pelo gás** sobre o meio exterior.

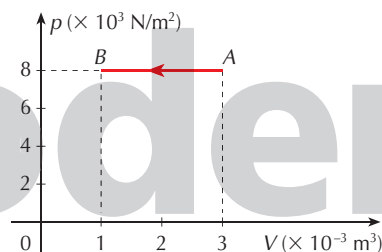
Respostas: a) $6 \cdot 10^{-3}$ m³; b) $2 \cdot 10^3$ J, realizado pelo gás.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.158 Um gás ideal é comprimido isobaricamente como indica o gráfico. Sejam *A* o estado inicial e *B* o estado final da massa gasosa. A temperatura inicial do gás é T_A = 300 K.

a) Determine a temperatura final T_B do gás.

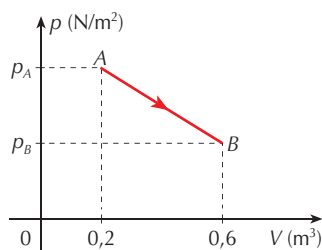
b) Calcule, pelo gráfico, o trabalho realizado no processo.

c) Esse trabalho é realizado pelo gás ou sobre o gás? Por quê?

P.159 O gráfico mostra uma transformação sofrida por 4 mols de um gás perfeito a partir de um estado *A*, em que a temperatura é 500 K, até outro estado *B*, em que a temperatura vale 600 K.

a) Determine as pressões inicial (p_A) e final (p_B) do gás.

b) Calcule o trabalho realizado no processo.

c) Esse trabalho é realizado pelo gás ou sobre o gás? Explique.

(Dado: R = 8,31 J/mol · K)

P.160 A massa de 56 g de um gás de massa molar *M* = 28 g/mol, suposto ideal, sofre a transformação *AB* indicada no gráfico.

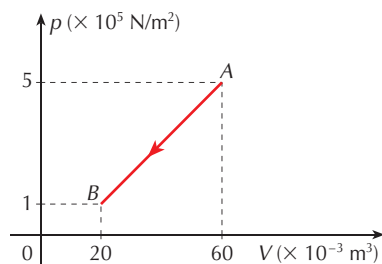
a) Determine as temperaturas T_A e T_B dos estados inicial e final da massa gasosa.

b) Calcule o trabalho realizado no processo *AB*.

c) O trabalho em questão é realizado pelo gás ou sobre o gás? Explique.

(Dado: R = 8,31 J/mol · K)

Seção 9.2

O princípio da conservação da energia aplicado à Termodinâmica

Objetivos

- Conceituar energia interna de um sistema.
- Compreender a relação entre a variação da energia interna de um sistema e a sua temperatura.
- Enunciar a primeira lei da Termodinâmica.

Termos e conceitos

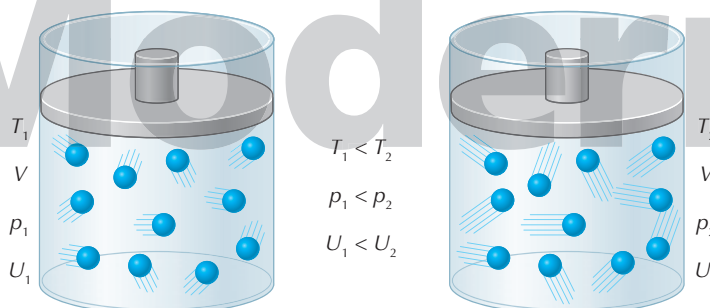
- energia externa
- energia interna
- gás monoatômico

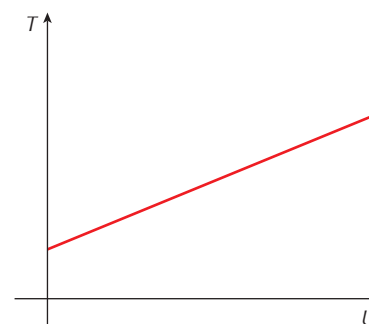
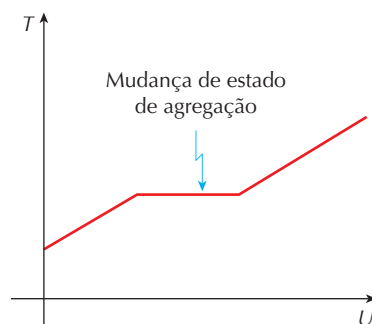
1 Energia interna. Lei de Joule para os gases perfeitos

A energia total de um sistema é composta de duas parcelas: a energia externa e a energia interna.

A **energia externa** do sistema é devida às relações que ele guarda com seu meio exterior — energia cinética e energia potencial.

A **energia interna** do sistema relaciona-se com suas condições intrínsecas. Num gás, corresponde às parcelas: energia térmica, que se associa ao movimento de agitação térmica das moléculas; energia potencial de configuração, associada às forças internas conservativas; energias cinéticas atômico-moleculares, ligadas à rotação das moléculas, às vibrações intramoleculares e aos movimentos intra-atômicos das partículas elementares.

Não se mede diretamente a energia interna U de um sistema. No entanto, é importante conhecer a **variação da energia interna** ΔU do sistema durante um processo termodinâmico. Para os **gases ideais monoatômicos**, essa variação é determinada somente pela variação da energia cinética de translação das moléculas que constituem o sistema.

Há processos em que a energia interna varia e a temperatura permanece constante. É o que ocorre nas mudanças de estado de agregação. A energia recebida (calor latente) durante o processo aumenta a energia interna do sistema. Assim, durante uma fusão, o estado líquido tem maior energia interna que o estado sólido, embora durante o processo não esteja ocorrendo variação de temperatura. Por outro lado, nas transformações gasosas, a variação de energia interna (ΔU) é sempre acompanhada de variação de temperatura (ΔT).

V2_P1_UN_D_CAP_09a.indd 177 22.08.09 10:24:20

Retomemos a transformação isobárica descrita no item anterior (**página 173, fig. 2**). Vimos que o gás recebeu a quantidade de calor Q e realizou o trabalho $\mathcal{T}$. Tendo ocorrido variação de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$, variou a energia cinética das moléculas do gás e, portanto, variou a energia interna. De acordo com a teoria cinética dos gases, sendo n o número de mols do gás (**página 163**), temos:

Energia cinética molecular inicial: $E_1 = \frac{3}{2}\ nRT_1$

Energia cinética molecular final: $E_2 = \frac{3}{2}\ nRT_2$

Variação da energia cinética molecular: $\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{3}{2}\ nR \cdot (T_2 - T_1)$

Essa variação ΔE corresponde à variação da energia interna ΔU do gás, suposto ideal e monoatômico:

$$\Delta U = \Delta E = \frac{3}{2} nR \cdot (T_2 - T_1)$$

Note que, se a temperatura final T_2 é maior que a temperatura inicial T_1, a energia interna do gás aumenta. Se T_2 for menor que T_1, a energia interna do gás diminui. No caso de a temperatura final T_2 ser igual à inicial T_1, a energia interna do gás não varia.

Situações possíveis	Energia interna
$T_2 > T_1 \Rightarrow \Delta T > 0 \Rightarrow \Delta U > 0$	aumenta
$T_2 < T_1 \Rightarrow \Delta T < 0 \Rightarrow \Delta U < 0$	diminui
$T_2 = T_1 \Rightarrow \Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$	não varia

Podemos, assim, enunciar a lei de Joule para os gases perfeitos:

A energia interna de uma dada quantidade de um gás perfeito é função exclusiva de sua temperatura.

2 Primeira lei da Termodinâmica

Num processo termodinâmico sofrido por um gás, há dois tipos de trocas energéticas com o meio exterior: o calor trocado Q e o trabalho realizado $\mathcal{T}$.

A variação de energia interna ΔU sofrida pelo sistema é consequência do balanço energético entre essas duas quantidades. Tomando como exemplo uma transformação isobárica como a da página 173 (**fig. 2**), se o gás recebeu do meio exterior uma quantidade de calor $Q = 20$ J e realizou um trabalho sobre o meio exterior $\mathcal{T} = 3$ J, sua energia interna aumentou de $\Delta U = 17$ J. Em outras palavras, o gás recebeu 20 J de energia do meio exterior (na forma de calor), perdeu 3 J de energia (na forma de trabalho), tendo absorvido 17 J de energia, que aumentaram a energia cinética de suas moléculas e, portanto, sua energia interna. Na **figura 6**, representam-se esquematicamente essas trocas energéticas.

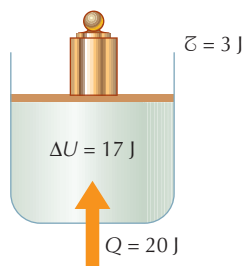



Figura 6. A variação de energia interna ΔU do gás é dada por $\Delta U = Q - \mathcal{T}$.

Portanto, sendo Q a quantidade de calor trocada pelo sistema, $\mathcal{T}$ o trabalho realizado e ΔU a variação de energia interna do sistema, podemos escrever:

$$\Delta U = Q - \mathcal{T}$$

Essa fórmula traduz analiticamente a **primeira lei da Termodinâmica:**

A variação da energia interna de um sistema é dada pela diferença entre o calor trocado com o meio exterior e o trabalho realizado no processo termodinâmico.

A primeira lei da Termodinâmica é uma reafirmação do princípio da conservação da energia e, embora tenha sido estabelecida tomando-se como ponto de partida a transformação de um gás, é válida para qualquer processo natural que envolva trocas energéticas.

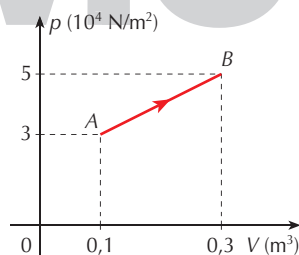
EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 51 Seis mols de um gás ideal monoatômico sofrem o processo termodinâmico AB indicado no gráfico. Sendo $R = 8{,}31$ J/mol · K, determine:

a) as temperaturas inicial e final do gás;

b) a variação de energia interna do gás no processo AB;

c) o trabalho realizado pelo gás ao passar do estado A para o estado B;

d) a quantidade de calor trocada pelo gás na transformação de A para B.

Solução:

a) As temperaturas T_A e T_B podem ser calculadas pela aplicação da equação de Clapeyron: $pV = nRT$.

Para o estado A, obtemos do gráfico: $p_A = 3 \cdot 10^4$ N/m² e $V_A = 0{,}1$ m³

Para o estado B, $p_B = 5 \cdot 10^4$ N/m² e $V_B = 0{,}3$ m³. Sendo $n = 6$ mols e $R = 8{,}31$ J/mol · K, temos:

$$p_A V_A = nRT_A \Rightarrow 3 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1 = 6 \cdot 8{,}31 \cdot T_A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{T_A \simeq 60 \text{ K}}$$

$$p_B V_B = nRT_B \Rightarrow 5 \cdot 10^4 \cdot 0{,}3 = 6 \cdot 8{,}31 \cdot T_B \Rightarrow$$

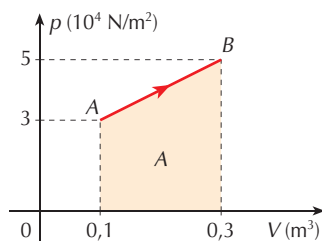
$$\Rightarrow \boxed{T_B \simeq 301 \text{ K}}$$

b) Como se trata de um gás ideal monoatômico, a variação de energia interna é dada por:

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR \cdot (T_B - T_A)$$

Então:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 6 \cdot 8{,}31 \cdot (301 - 60) \Rightarrow \boxed{\Delta U \simeq 1{,}8 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

c) O trabalho realizado pelo gás na expansão AB pode ser calculado pela área do trapézio destacado no gráfico abaixo:

$$A = \frac{5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4}{2} \cdot (0{,}3 - 0{,}1) \Rightarrow A = 4 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2 \Rightarrow A = 0{,}8 \cdot 10^4$$

Portanto, o trabalho vale: $\boxed{\tau = 0{,}8 \cdot 10^4\ J}$

d) Aplicando ao processo a primeira lei da Termodinâmica, teremos:

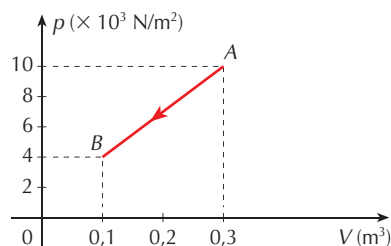
$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow Q = \Delta U + \tau \Rightarrow Q = 1{,}8 \cdot 10^4 + 0{,}8 \cdot 10^4 \Rightarrow \boxed{Q = 2{,}6 \cdot 10^4\ J}$$

Observe que, no processo AB, o gás recebeu do meio externo uma quantidade total de energia, na forma de calor, igual a $2{,}6 \cdot 10^4$ J. Dessa energia, $0{,}8 \cdot 10^4$ J foram "gastos" na forma de trabalho, para expandir o gás. Os restantes $1{,}8 \cdot 10^4$ J foram "usados" para aumentar a agitação térmica das moléculas do gás e, portanto, para aumentar a sua energia interna.

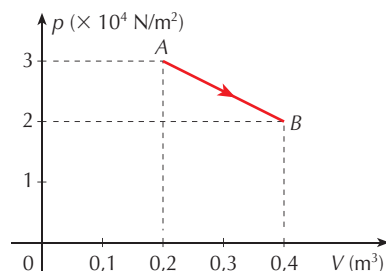
Respostas: a) $\simeq$ 60 K e $\simeq$ 301 K; b) $\simeq 1{,}8 \cdot 10^4$ J; c) $0{,}8 \cdot 10^4$ J; d) $2{,}6 \cdot 10^4$ J

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 161 Certa quantidade de um gás ideal monoatômico sofre o processo termodinâmico AB indicado no gráfico. Sendo $R = 8{,}31$ J/mol · K e $T_A = 600$ K a temperatura inicial do gás, determine:

a) o número de mols do gás;
b) a temperatura final T_B;
c) a variação de energia interna que o gás sofre no processo;
d) o trabalho realizado sobre o gás na compressão do estado A para o estado B;
e) a quantidade de calor que o gás troca com o ambiente no processo AB.

P. 162 O gráfico indica uma transformação AB sofrida por 2 mols de um gás ideal monoatômico. Sendo $R = 8{,}31$ J/mol · K, determine:

a) as temperaturas inicial e final do gás;
b) a variação de energia interna do gás no processo AB;
c) o trabalho realizado pelo gás ao passar do estado A para o estado B;
d) a quantidade de calor trocada pelo gás durante a transformação AB.

Seção 9.3

Transformações gasosas

Objetivos

- Analisar as transformações gasosas isotérmicas, isobáricas, isocóricas e adiabáticas a partir da primeira lei da Termodinâmica.
- Determinar o trabalho realizado por uma transformação cíclica, usando o diagrama $p \times V$.
- Compreender as relações entre calor e trabalho nas transformações cíclicas.

Termos e conceitos

- calor molar a pressão constante
- calor molar a volume constante
- relação de Mayer
- expoente de Poisson

Vamos reexaminar, na seção, as transformações de um gás ideal (isotérmica, isobárica, isocórica e adiabática), considerando a primeira lei da Termodinâmica.

1 Transformação isotérmica (temperatura constante)

Como a temperatura não varia, a variação de energia interna do gás é **nula**:

$$\Delta T = 0 \Rightarrow \boxed{\Delta U = 0}$$

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \mathcal{T} = 0 \Rightarrow \boxed{Q = \mathcal{T}}$$

Numa transformação isotérmica, o calor trocado pelo gás com o meio exterior é igual ao trabalho realizado no mesmo processo.

Se o gás se expande, de modo que se mantenha sempre em equilíbrio térmico com o ambiente (temperatura constante), ele absorve calor do exterior em quantidade exatamente igual ao trabalho realizado. Por exemplo, se absorver 50 J de calor do ambiente, o trabalho realizado será exatamente 50 J. No diagrama de trabalho (**fig. 7**), a área destacada é numericamente igual ao trabalho realizado $\mathcal{T}$.

Note que, **no processo isotérmico, não há variação de temperatura, mas há troca de calor.**

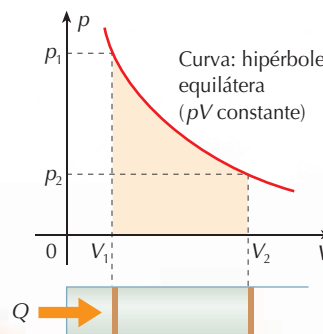



Figura 7. Expansão isotérmica ($\Delta U = 0 \Rightarrow \mathcal{T} = Q$).

No extintor de dióxido de carbono, o agente extintor (CO_2) é mantido no estado líquido, sob pressão. Ao acionar o gatilho, o CO_2 sofre uma rápida descompressão, passando para o estado gasoso (expansão adiabática).

V2_P1_UN_D_CAP_09a.indd 181 26.08.09 09:07:53

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 52 Numa transformação isotérmica de um gás ideal, o produto pV é constante e vale 33.240 J. A constante dos gases perfeitos é 8,31 J/mol · K e o número de mols do gás é $n = 5$. Durante o processo, o gás recebe do meio exterior 2.000 J do calor. Determine:

a) se o gás está sofrendo expansão ou compressão;

b) a temperatura do processo;

c) a variação da energia interna do gás;

d) o trabalho realizado na transformação.

Solução:

a) Recebendo calor, o gás realiza trabalho sobre o meio exterior e, portanto, se expande. O processo em questão é uma **expansão isotérmica**.

b) Sendo $pV = 33.240$ J, $n = 5$ e $R = 8,31$ J/mol · K, aplicando-se a equação de Clapeyron, resulta:

$$pV = nRT \Rightarrow 33.240 = 5 \cdot 8,31 \cdot T \Rightarrow \boxed{T = 800 \text{ K}}$$

c) Numa transformação isotérmica, não havendo variação de temperatura, é nula a variação de energia interna; assim, de acordo com a lei de Joule, temos:

$$\Delta T = 0 \Rightarrow \boxed{\Delta U = 0}$$

d) O gás recebe 2.000 J de calor: $Q = 2.000$ J. Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \mathcal{T} \Rightarrow 0 = Q - \mathcal{T} \Rightarrow \mathcal{T} = Q \Rightarrow \boxed{\mathcal{T} = 2.000 \text{ J}}$$

Respostas: a) Expansão isotérmica; b) 800 K; c) zero; d) 2.000 J

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 163 Numa compressão isotérmica, o trabalho realizado sobre o gás é 600 J. Determine o calor cedido pelo gás no processo e a variação da energia interna.

P. 164 Um gás encontra-se inicialmente sob pressão de 10^5 N/m^2 e à temperatura de 500 K, ocupando um volume de 1,66 m^3. O gás se expande isotermicamente ao receber 400 J de calor do meio exterior. Sendo a constante universal dos gases perfeitos $R = 8,3$ J/mol · K, determine:

a) o número de mols do gás que sofre o processo;

b) o trabalho realizado durante a transformação;

c) a variação de energia interna do gás.

P. 165 Três mols de um gás ideal monoatômico sofrem um processo termodinâmico representado graficamente pela hipérbole equilátera AB indicada na figura. A área destacada no gráfico vale, numericamente, $9,5 \cdot 10^4$.

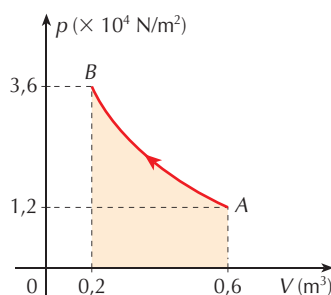
a) Que processo o gás está sofrendo? Explique o porquê de sua conclusão.

b) Em que temperatura o processo se realiza?

c) Qual é a variação de energia interna do gás no processo? Por quê?

d) Qual é o trabalho realizado sobre o gás nesse processo AB?

e) Durante o processo AB, o gás recebe ou perde calor? Por quê? Qual é a quantidade de calor trocada pelo gás?

(Dado: $R = 8,31$ J/mol · K)

2 Transformação isobárica (pressão constante)

Na transformação isobárica, o trabalho realizado é dado por: $\mathcal{Z} = p \cdot \Delta V$

Sendo m a massa do gás e c_p seu **calor específico a pressão constante**, o calor trocado pelo gás, ao sofrer a variação de temperatura ΔT numa transformação isobárica, é dado por:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Nessa fórmula, fazendo $m = nM$ (sendo n o número de mols e M a massa molar do gás), temos:

$$Q = n \cdot M \cdot c_p \cdot \Delta T$$

O produto da massa molar M do gás pelo seu calor específico c_p é denominado **calor molar a pressão constante** (C_p) do gás, sendo expresso em cal/mol · K ou J/mol · K.

$$M \cdot c_p = C_p$$

Então, a quantidade de calor trocada pode ser escrita como:

$$Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Pela lei de Charles, no processo isobárico, o volume V é diretamente proporcional à temperatura T, ou seja: $V = KT$ (sendo K constante). Portanto, numa expansão isobárica (**fig. 8**), o volume e a temperatura aumentam, ocorrendo também aumento da energia interna do gás:

$$\Delta U > 0$$

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \mathcal{Z} \Rightarrow Q > \mathcal{Z}$$

Figura 8. **Expansão isobárica. O gás recebe calor e realiza trabalho ($Q > \mathcal{Z}$).**

Numa expansão isobárica, a quantidade de calor recebida é maior que o trabalho realizado.

3 Transformação isocórica (volume constante)

Na transformação isocórica, o trabalho realizado é nulo, pois não há variação de volume ($\Delta V = 0$):

$$\mathcal{Z} = 0$$

Sendo m a massa do gás e ΔT a variação de temperatura, o calor trocado é dado por:

$$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$

Nessa fórmula, c_v é o **calor específico a volume constante** do gás.

Como $m = nM$, temos:

$$Q = n \cdot M \cdot C_v \cdot \Delta T$$

O produto da massa molar M do gás pelo seu calor específico c_v é o **calor molar a volume constante** C_v do gás, sendo expresso em cal/mol · K ou J/mol · K:

$$M \cdot c_v = C_v$$

Então, a quantidade de calor trocada pode ser escrita como:

$$Q = n \cdot C_v \cdot \Delta T$$

Ao receber calor isocoricamente (**fig. 9**), o calor recebido vai apenas aumentar a energia cinética das moléculas e, portanto, a temperatura, pois não há realização de trabalho.

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$\Delta U = Q - \mathcal{T}$. Como $\mathcal{T} = 0$, temos:

$$\Delta U = Q$$

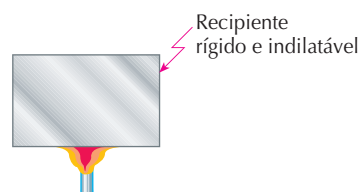



Figura 9. **Transformação isocórica ($\Delta U = Q$).**

Numa transformação isocórica, a variação da energia interna do gás é igual à quantidade de calor trocada com o meio exterior.

Observação

Partindo de uma mesma temperatura inicial T_1, n mols de um gás são aquecidos até uma temperatura final T_2 (**fig. 10**) por dois processos: um isobárico AB e outro isocórico AC. Nos dois processos a variação de temperatura é a mesma e, portanto, a variação de energia interna ΔU é a mesma. Seja Q_p o calor que o gás recebe no aquecimento isobárico e Q_v o calor recebido no isocórico. Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, obtemos:

Figura 10. **Nos processos AB e AC, a variação de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ é a mesma e, portanto, a variação de energia interna ΔU também é a mesma.**

$$Q_p = \Delta U + \mathcal{T} \quad \text{e} \quad Q_v = \Delta U$$

Como há o trabalho $\mathcal{T} \neq 0$ no processo isobárico, concluímos que o calor trocado sob pressão constante Q_p é maior que o calor trocado a volume constante Q_v. Sendo assim, temos:

$$Q_p > Q_v \Rightarrow c_p > c_v \Rightarrow C_p > C_v$$

Subtraindo membro a membro as duas expressões anteriores, vem: $Q_p - Q_v = \mathcal{T}$ ①

Por outro lado, temos: $Q_p = n \cdot C_p \cdot \Delta T$ ②, $Q_v = n \cdot C_v \cdot \Delta T$ ③ e $\mathcal{T} = p \cdot \Delta V = n \cdot R \cdot \Delta T$ ④

Substituindo ②, ③ e ④ em ①, obtemos:

$$n \cdot C_p \cdot \Delta T - n \cdot C_v \cdot \Delta T = n \cdot R \cdot \Delta T \Rightarrow C_p - C_v = R$$

Essa fórmula é válida qualquer que seja a natureza do gás e é denominada **relação de Mayer**. O valor de R vai depender das unidades em que estiverem expressos os calores molares C_p e C_v. Assim, podemos ter:

$$R \simeq 8{,}31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad \text{ou} \quad R \simeq 2 \text{ cal/mol} \cdot \text{K}$$

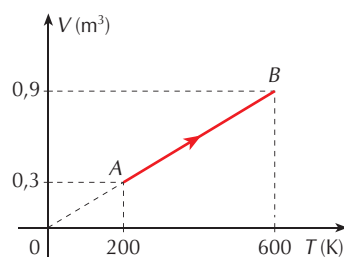
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 53 A massa de 20 g de hélio (massa molar $M = 4$ g/mol), considerado um gás ideal, dilata-se isobaricamente como mostra o gráfico. Sendo $R = 8{,}31$ J/mol · K a constante universal dos gases perfeitos, $c_p = 1{,}25$ cal/g · K o calor específico do hélio sob pressão constante e 1 cal = 4,18 J, determine:

a) a pressão sob a qual se realiza o processo;

b) a quantidade de calor que o gás recebe durante o processo;

c) o trabalho realizado pelo gás nessa dilatação;

d) a variação de energia interna sofrida pelo gás.

Solução:

a) O número de mols de hélio (M = 4 g/mol) existentes na massa $m = 20$ g é dado por:

$$n = \frac{m}{M} \Rightarrow n = \frac{20}{4} \Rightarrow n = 5 \text{ mols}$$

Para o estado A do gás: $V_A = 0{,}3$ m³ e $T_A = 200$ K.

Como R = 8,31 J/mol · K, utilizando a equação de Clapeyron, teremos:

$$pV_A = nRT_A \Rightarrow p \cdot 0{,}3 = 5 \cdot 8{,}31 \cdot 200 \Rightarrow \boxed{p \simeq 2{,}77 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2}$$

b) Na fórmula $Q_p = m \cdot c_p \cdot \Delta T$, devemos substituir os seguintes valores:
$m = 20$ g; $c_p = 1{,}25$ cal/g · K; $\Delta T = 600$ K − 200 K = 400 K; assim:

$$Q_p = 20 \cdot 1{,}25 \cdot 400 \Rightarrow Q_p = 10^4 \text{ cal} \Rightarrow \boxed{Q_p = 4{,}18 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

c) Como o processo é isobárico, podemos calcular o trabalho realizado usando: $\tau = p \cdot \Delta V$

Do gráfico, obtemos: $\Delta V = 0{,}9 \text{ m}^3 - 0{,}3 \text{ m}^3 = 0{,}6 \text{ m}^3$

Substituindo, temos:

$$\tau = 2{,}77 \cdot 10^4 \cdot 0{,}6 \Rightarrow \boxed{\tau \simeq 1{,}66 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

d) A variação da energia interna ΔU é calculada pela aplicação da primeira lei da Termodinâmica:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = 4{,}18 \cdot 10^4 - 1{,}66 \cdot 10^4 \Rightarrow \boxed{\Delta U = 2{,}52 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

Respostas: a) $\simeq 2{,}77 \cdot 10^4$ N/m²; b) $4{,}18 \cdot 10^4$ J; c) $\simeq 1{,}66 \cdot 10^4$ J; d) $2{,}52 \cdot 10^4$ J

R. 54 Admita que o aquecimento do mesmo gás do exercício anterior (de 200 K para 600 K) tivesse sido realizado isocoricamente. Determine, para essa situação:

a) a quantidade de calor recebida pelo gás;

b) o trabalho realizado pelo gás nesse processo;

c) a variação de energia interna sofrida pelo gás.

Solução:

a) O calor molar sob pressão constante do gás pode ser calculado por: $C_p = Mc_p$

Como $c_p = 1{,}25$ cal/g · K e $M = 4$ g/mol, vem: $C_p = 4 \cdot 1{,}25 \Rightarrow C_p = 5$ cal/mol · K

Pela relação de Mayer, temos: $C_p - C_v = R$

No caso, pelas unidades usadas, temos: R = 2 cal/mol · K

Então: $5 - C_v = 2 \Rightarrow C_v = 3$ cal/mol · K

A quantidade de calor trocada pelo gás ($n = 5$) para o aquecimento $\Delta T = 400$ K será dada por:

$$Q_v = n \cdot C_v \cdot \Delta T \Rightarrow Q_v = 5 \cdot 3 \cdot 400 \Rightarrow Q_v = 6 \cdot 10^3 \text{ cal} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_v = 6 \cdot 10^3 \cdot 4{,}18 \Rightarrow \boxed{Q_v \simeq 2{,}51 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

b) Nesse caso, o processo é **isocórico** e, portanto, não há realização de trabalho: $\boxed{\tau = 0}$

c) Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q_v - \tau \Rightarrow \Delta U = Q_v \Rightarrow \boxed{\Delta U \simeq 2{,}51 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

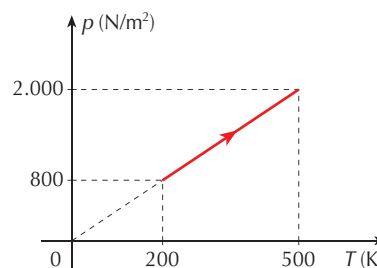
Respostas: a) $\simeq 2{,}51 \cdot 10^4$ J; b) zero; c) $\simeq 2{,}51 \cdot 10^4$ J

R. 55 Um gás sofre certa transformação cujo gráfico $p = f(T)$, ao lado, está representando. Sendo a constante universal dos gases perfeitos $R = 8{,}31$ J/mol · K; o número de mols do gás $n = 5$; o calor molar a volume constante do gás $C_v = 2{,}98$ cal/mol · K e 1 cal = 4,18 J, determine:

a) a transformação sofrida pelo gás;

b) o volume de gás durante o processo;

c) a quantidade de calor que o gás recebe durante a transformação;

d) a variação da energia interna do gás, nessa transformação.

Solução:

a) Como a função $p = f(T)$ é linear, de acordo com as leis dos gases, a transformação é **isocórica**, isto é, o volume permanece constante.

b) Do gráfico, tiramos o par de valores $p = 2.000$ N/m² e $T = 500$ K.
Sendo $n = 5$ e $R = 8{,}31$ J/mol · K, aplicando a equação de Clapeyron, temos:

$$pV = nRT \Rightarrow 2.000 \cdot V = 5 \cdot 8{,}31 \cdot 500 \Rightarrow \boxed{V \simeq 10{,}4 \text{ m}^3}$$

c) Para calcular a quantidade de calor recebida pelo gás, sendo $C_v = 2{,}98$ cal/mol · K e $\Delta T = 300$ K, temos:

$$Q_v = n \cdot C_v \cdot \Delta T \Rightarrow Q_v = 5 \cdot 2{,}98 \cdot 300 \Rightarrow Q_v = 4.470 \text{ cal} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_v = 4.470 \cdot 4{,}18 \text{ J} \Rightarrow \boxed{Q_v \simeq 1{,}87 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

d) Aplicando a primeira lei da Termodinâmica e lembrando que na transformação isocórica não há realização de trabalho ($\mathcal{T} = 0$), temos:

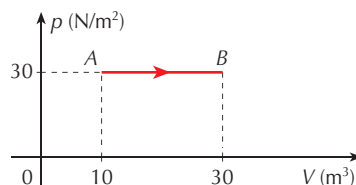
$$\Delta U = Q_v - \mathcal{T} \Rightarrow \Delta U = Q_v \Rightarrow \boxed{\Delta U \simeq 1{,}87 \cdot 10^4 \text{ J}}$$

Respostas: a) Isocórica; b) $\simeq 10{,}4$ m³; c) $\simeq 1{,}87 \cdot 10^4$ J; d) $\simeq 1{,}87 \cdot 10^4$ J

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 166 No processo isobárico indicado no gráfico ao lado, o gás recebeu 1.500 J de energia do ambiente. Determine:

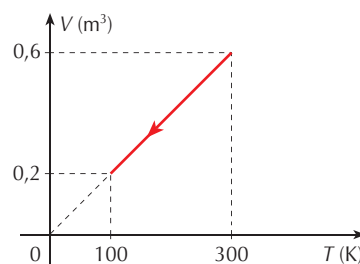
a) o trabalho realizado na expansão;

b) a variação de energia interna do gás.

P. 167 O gráfico representa uma compressão isobárica de um gás sob pressão de $2 \cdot 10^3$ N/m².
Sabendo que no processo o gás perdeu $2{,}0 \cdot 10^3$ J de calor, determine:

a) o número de mols do gás que sofre o processo;

b) o trabalho realizado sobre o gás;

c) a variação de energia interna sofrida pelo gás.

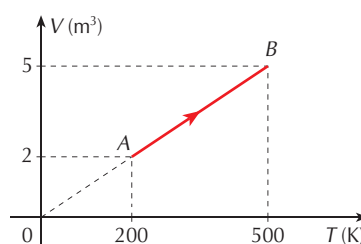
(Considere $R = 8{,}31$ J/mol · K)

P. 168 A quantidade de 3 mols de um gás ideal monoatômico sofre a expansão isobárica AB representada no gráfico. Sendo o calor molar sob pressão constante desse gás $C_p = 5$ cal/mol · K e adotando $R = 8{,}31$ J/mol · K, determine:

a) a pressão sob a qual o gás se expande;

b) a quantidade de calor recebida pelo gás;

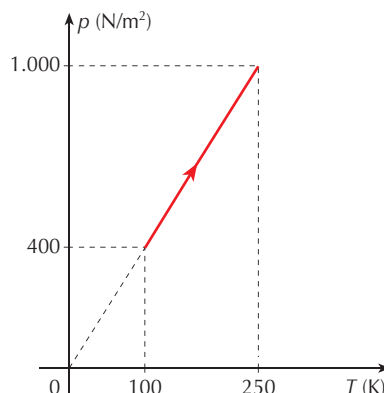
c) o trabalho que o gás realiza na expansão;

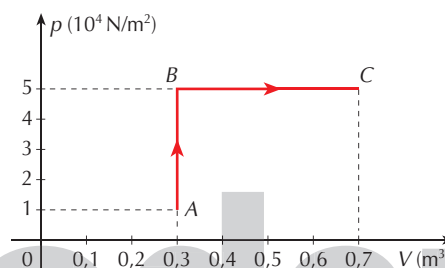
d) a variação de energia interna sofrida pelo gás.

(Dado: 1 cal = 4,18 J)

P. 169 No exercício anterior, se o aquecimento de 200 K a 500 K fosse isocórico, qual seria a quantidade de calor recebida pelo gás? Considere $R = 2$ cal/mol · K.

P. 170 Numa transformação a volume constante, um gás recebe 500 J de calor do ambiente. Qual é o trabalho realizado e a variação de energia interna do gás?

P. 171 O gráfico corresponde ao aquecimento isocórico de 1 mol de um gás perfeito, cujo calor molar a volume constante é 2,98 cal/mol · K. Sendo a constante universal dos gases ideais $R = 8,31$ J/mol · K e sabendo que 1 cal = 4,18 J, determine:

a) o volume do gás durante o processo;
b) a quantidade de calor recebida pelo gás;
c) a variação de energia interna do gás.

P. 172 Durante o processo termodinâmico ABC indicado no gráfico ao lado, certa massa de gás ideal recebe do meio externo $8 \cdot 10^4$ J na forma de calor. Determine:

a) o trabalho realizado na etapa AB do processo;
b) o trabalho realizado na etapa BC do processo;
c) o trabalho realizado em todo o processo ABC;
d) a variação de energia interna sofrida pelo gás no processo ABC.

4 Transformação adiabática

Um gás sofre uma transformação adiabática quando não troca calor com o meio exterior, ou seja:

$$Q = 0$$

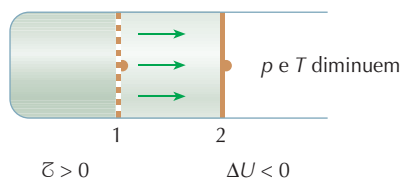
Essa transformação pode ocorrer quando o gás está contido no interior de um recipiente termicamente isolado do ambiente ou quando ele sofre expansões e compressões suficientemente rápidas para que as trocas de calor com o ambiente possam ser consideradas desprezíveis. Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \mathcal{Z} \text{ e, sendo } Q = 0\text{, vem: } \boxed{\Delta U = -\mathcal{Z}}$$

Numa transformação adiabática, a variação de energia interna é igual em módulo e de sinal contrário ao trabalho realizado na transformação.

Considere um gás perfeito contido num cilindro termicamente isolado do exterior, como mostra a **figura 11**, e provido de um êmbolo que pode deslizar sem atrito, aumentando e diminuindo o volume do gás. Observe que o gás não pode trocar calor com o ambiente, mas, havendo variação de volume, ele **pode trocar energia** com o ambiente, **na forma de trabalho**.

Numa **expansão adiabática** o trabalho é realizado **pelo gás** (fig. 11A).

A Expansão

B Compressão

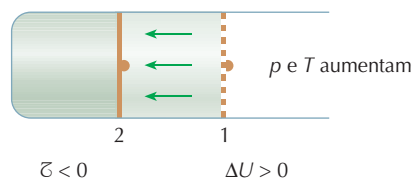



Figura 11. Transformações adiabáticas.

Por exemplo, seja 50 J o trabalho realizado por ele. Esse trabalho equivale a uma perda de energia por parte do gás. Como não há trocas de calor, essa energia provém do próprio gás, isto é, a energia interna do gás diminui de 50 J (pois: $Q = 0; \mathcal{T} = 50\ \text{J} \Rightarrow \Delta U = -50\ \text{J}$).

Note que na **expansão adiabática** o volume aumenta e a temperatura diminui, pois a **energia interna diminui**. Em consequência, a pressão também diminui, conforme a lei geral dos gases perfeitos, ou seja:

$$\frac{pV}{T} = \text{constante}$$

Numa **compressão adiabática** (fig. 11B) o trabalho é realizado **sobre o gás**. Portanto, o gás está recebendo energia do exterior. Assim, se o trabalho realizado sobre o gás é de 50 J, ele está recebendo do ambiente 50 J de energia. Como não há trocas de calor a considerar, a energia interna do gás aumenta de 50 J ($Q = 0; \mathcal{T} = -50\ \text{J} \Rightarrow \Delta U = 50\ \text{J}$).

Na **compressão adiabática** o volume diminui e a temperatura aumenta, pois **a energia interna aumenta** e a pressão também aumenta.

Ao se comprimir rapidamente o ar para introduzi-lo no pneu, ele sofre um processo adiabático, pois a rapidez da compressão não permite a troca de calor com o ambiente.

A pressão p e o volume V do gás, num processo adiabático, relacionam-se pela chamada **lei de Poisson***, que pode ser expressa por:

$$p \cdot V^{\gamma} = \text{constante}$$

Nessa fórmula, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ é denominado **expoente de Poisson**, sendo c_p e c_v os calores específicos do gás a pressão constante e a volume constante, respectivamente.

* **POISSON**, Siméon Denis (1781-1840), matemático e físico francês, notabilizou-se principalmente por seus trabalhos nas áreas da Eletrostática e do Magnetismo.

No diagrama de trabalho ao lado (**fig. 12**) vemos a curva representativa da transformação adiabática (em vermelho) e as isotermas T_1 (temperatura inicial) e T_2 (temperatura final).

A área destacada em amarelo entre a curva e o eixo das abscissas equivale numericamente ao trabalho realizado na transformação adiabática.

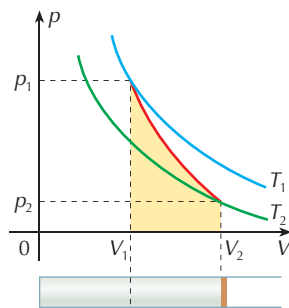



Figura 12. O trabalho na transformação adiabática é dado pela área destacada em amarelo.

Observação

Como consequência da lei de Joule dos gases perfeitos, podemos concluir:

A variação de energia interna de um gás ideal só depende dos estados inicial e final da massa gasosa para quaisquer que sejam as transformações que levam o sistema do estado inicial ao estado final.

Desse modo, ao passar do estado 1 (temperatura T_1) para o estado 2 (temperatura T_2), representados na **figura 13**, a energia interna do gás variou de um valor U_1 para um valor U_2. A variação de energia interna ΔU, qualquer que seja o conjunto de transformações que levam o sistema do estado 1 para o estado 2 (**fig. 13A**), será dada pela diferença:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Como a variação de energia interna não depende do "caminho", no diagrama pV podemos calcular ΔU para qualquer conjunto de transformações. Por facilidade, vamos escolher a transformação isocórica $1A$ seguida da isotérmica $A2$ (**fig. 13B**).

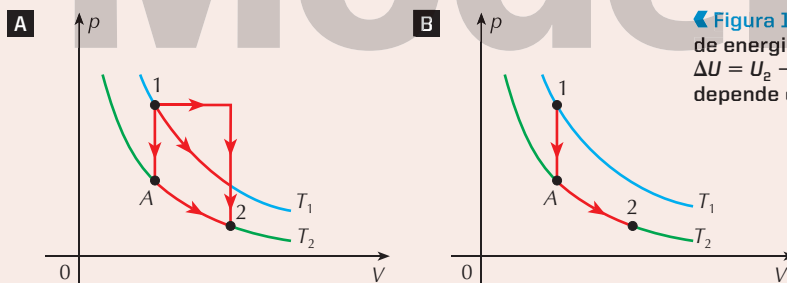



Figura 13. A variação de energia interna $\Delta U = U_2 - U_1$ não depende do "caminho".

Pela primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U_{1A} = Q_v = m \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot C_v \cdot \Delta T$$

$$\Delta U_{A2} = 0 \text{ (transformação isotérmica)}$$

Portanto, só há variação de energia interna na transformação $1A$. Logo:

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot C_v \cdot \Delta T$$

em que c_v e C_v são, respectivamente, o calor específico e o calor molar do gás a volume constante.

Entre na rede No endereço eletrônico (em espanhol) http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/termo1/termo1.html (acesso em agosto/2009), clicando no *link* "Cálculo del trabajo, calor y variación de energía interna de una transformación", você pode realizar diversas simulações, comparando as quantidades de energia envolvidas nos diferentes tipos de transformações gasosas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 56 Um gás perfeito sofre um processo adiabático no qual realiza um trabalho de 300 J.

a) O gás está se expandindo ou se contraindo? Por quê?

b) Qual é a quantidade de calor que o gás está trocando com o ambiente?

c) De quanto é a variação de energia interna do gás nesse processo?

d) Explique como se modificam as variáveis de estado (volume, temperatura e pressão) do gás nessa transformação.

Solução:

a) Como o trabalho de 300 J é realizado **pelo gás**, isso significa que ele está sofrendo uma **expansão**.

b) Sofrer um processo **adiabático** significa que o gás **não troca calor** com o ambiente, seja porque o gás está isolado termicamente, seja porque a expansão ocorre rapidamente. Temos, portanto:

$$\boxed{Q = 0}$$

c) Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, sendo $\tau = 300$ J e $Q = 0$, vem:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow \Delta U = 0 - 300 \Rightarrow \boxed{\Delta U = -300 \text{ J}}$$

Portanto, a energia interna do gás **diminui** 300 J.

d) Sendo uma expansão, o **volume aumenta**. A diminuição da energia interna indica que a **temperatura diminui**. Como $\frac{pV}{T}$ = constante conclui-se que a **pressão diminui**.

Respostas: a) Expandindo-se; b) zero; c) −300 J; d) V aumenta, T e p diminuem.

R. 57 Sob pressão de 3 atm, o volume de um gás ideal será 9 ℓ. Esse volume diminui para 1 ℓ quando o gás sofre um processo adiabático. Considere que o expoente de Poisson para esse gás seja $\gamma = 1{,}5$.

a) Qual é a pressão final do gás?

b) Se a temperatura no estado inicial era 600 K, qual é seu valor no estado final?

Solução:

a) São dados: $p_1 = 3$ atm; $V_1 = 9\ell$; $V_2 = 1\ \ell$; $\gamma = 1{,}5$. Na equação da lei de Poisson, teremos:

$$p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma \Rightarrow 3 \cdot 9^{1,5} = p_2 \cdot 1^{1,5}$$

Elevando ao quadrado, temos:

$$3^2 \cdot 9^3 = (p_2)^2 \cdot 1^3 \Rightarrow 9 \cdot 729 = (p_2)^2 \cdot 1 \Rightarrow (p_2)^2 = 6.561 \Rightarrow \boxed{p_2 = 81 \text{ atm}}$$

b) Para o estado inicial:

$p_1 = 3$ atm; $V_1 = 9\ \ell$; $T_1 = 600$ K

Para o estado final: $p_2 = 81$ atm; $V_2 = 1\ \ell$; $T_2 = ?$

Aplicando a lei geral dos gases perfeitos:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{3 \cdot 9}{600} = \frac{81 \cdot 1}{T_2} \Rightarrow \boxed{T_2 = 1.800 \text{ K}}$$

Respostas: a) 81 atm; b) 1.800 K

R. 58 Certa quantidade de gás perfeito pode passar de um estado A para um estado B por dois "caminhos" possíveis:

1. transformação isocórica seguida de uma isobárica;

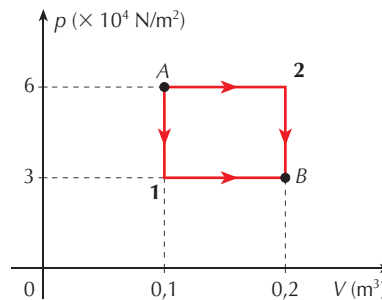
2. transformação isobárica seguida de uma isocórica.

Responda:

a) A que estado, A ou B, corresponde maior temperatura?

b) Qual é a variação de energia interna do gás no "caminho" **1** e no "caminho" **2**?

c) Em qual dos "caminhos" é maior o trabalho realizado pelo gás? Calcule esses trabalhos.

d) Em qual dos "caminhos" é maior a quantidade de calor trocada pelo gás? Quanto valem essas quantidades de calor?

Solução:

a) No estado *A*: $p_A = 6 \cdot 10^4\ N/m^2$; $V_A = 0{,}1\ m^3$; T_A

No estado *B*: $p_B = 3 \cdot 10^4\ N/m^2$; $V_B = 0{,}2\ m^3$; T_B

Aplicando a lei geral dos gases perfeitos, vem:

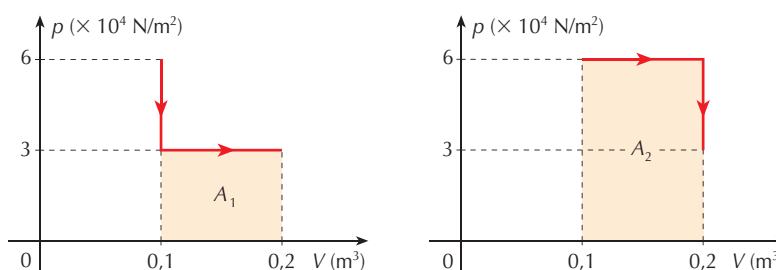
$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B} \Rightarrow \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1}{T_A} = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 0{,}2}{T_B} \Rightarrow 0{,}6 \cdot 10^4 \cdot T_A = 0{,}6 \cdot 10^4 \cdot T_B \Rightarrow \boxed{T_A = T_B}$$

Portanto, a temperatura variou durante as transformações, mas seu valor final (no estado *B*) é igual ao valor inicial (no estado *A*).

b) Nesse caso, se as temperaturas inicial e final são iguais, o mesmo acontece com as energias internas. Portanto: $U_B = U_A$

Como $\Delta U = U_B - U_A$, temos: $\boxed{\Delta U = 0}$

Observe que a variação de energia interna é nula, independentemente do "caminho" (**1**, **2** ou outro qualquer) que o gás seguiu para passar do estado inicial *A* para o estado final *B*.

c) Como o trabalho nas transformações isocóricas é nulo, o trabalho em cada um dos caminhos se resume ao realizado nas transformações isobáricas. Como estes podem ser obtidos pelas áreas destacadas nos gráficos, podemos comparar as áreas, antes de calcular os trabalhos:

Como $A_2 > A_1$, temos: $\boxed{\tau_2 > \tau_1}$

Calculando:

$$A_1 = 3 \cdot 10^4 \cdot (0{,}2 - 0{,}1) = 3 \cdot 10^3 \Rightarrow \boxed{\tau_1 = 3 \cdot 10^3\ J}$$

$$A_2 = 6 \cdot 10^4 \cdot (0{,}2 - 0{,}1) = 6 \cdot 10^3 \Rightarrow \boxed{\tau_2 = 6 \cdot 10^3\ J}$$

d) Aplicando a primeira lei da Termodinâmica à situação do problema:

$$\Delta U = Q - \tau$$

Sendo $\Delta U = 0$, temos: $0 = Q - \tau \Rightarrow Q = \tau$

Portanto, as quantidades de calor trocadas são iguais aos respectivos trabalhos realizados. Então:

$$\tau_2 > \tau_1 \Rightarrow \boxed{Q_2 > Q_1}$$

Quanto aos valores, temos:

$$Q_1 = \tau_1 \Rightarrow \boxed{Q_1 = 3 \cdot 10^3\ J} \qquad Q_2 = \tau_2 \Rightarrow \boxed{Q_2 = 6 \cdot 10^3\ J}$$

Respostas: a) $T_A = T_B$; b) zero; c) $\tau_2 > \tau_1$; $3 \cdot 10^3$ J e $6 \cdot 10^3$ J; d) $Q_2 > Q_1$; $3 \cdot 10^3$ J e $6 \cdot 10^3$ J

R. 59 Numa expansão adiabática, a temperatura de um mol de gás perfeito diminui 200 K. O calor molar a volume constante do gás é igual a 12,5 J/mol · K. Determine:

a) a quantidade de calor trocada com o meio externo;

b) a variação de energia interna do gás;

c) o trabalho realizado pelo gás durante o processo.

Solução:

a) Como o processo é adiabático, não há trocas de calor com o meio exterior: $\boxed{Q = 0}$

b) A variação de energia interna ΔU do gás pode ser calculada pela fórmula: $\Delta U = n \cdot C_v \cdot \Delta T$

Neste caso: $n = 1$; $C_v = 12{,}5$ J/mol · K; $\Delta T = -200$ K; assim, temos:

$$\Delta U = 1 \cdot 12{,}5 \cdot (-200) \Rightarrow \boxed{\Delta U = -2.500\ J}$$

c) O trabalho realizado pelo gás é igual em módulo e de sinal contrário à variação de energia interna:

Portanto: $\tau = -\Delta U \Rightarrow \tau = -(-2.500\ J) \Rightarrow \boxed{\tau = 2.500\ J}$

Respostas: a) Zero; b) $\Delta U = -2.500$ J; c) $\tau = 2.500$ J

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.173 Um gás perfeito é comprimido adiabaticamente, realizando-se sobre ele um trabalho de módulo 500 J.

a) Qual é a quantidade de calor que o gás troca com o meio externo durante o processo?

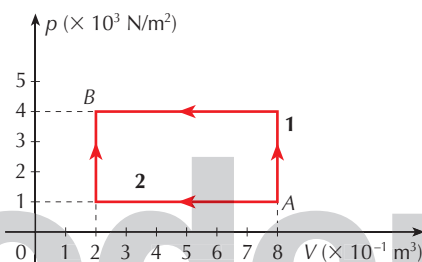
b) Qual é a variação de energia interna sofrida pelo gás nessa transformação?

c) Como se modificam o volume, a temperatura e a pressão do gás no processo adiabático em questão? Justifique.

P.174 Estabeleça, em termos de trocas energéticas e de variação das variáveis de estado, as diferenças entre a expansão isobárica e a expansão adiabática.

P.175 Um gás perfeito ocupa um volume de 2 ℓ e exerce uma pressão de 16 atm num recinto de volume variável isolado termicamente do meio externo. Que pressão será exercida pelo gás se o volume for aumentado para 8 ℓ? O expoente de Poisson para esse gás é $\gamma = 1{,}5$.

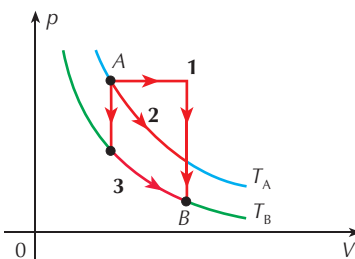
P.176 Retome o exercício anterior. Se a temperatura inicial do gás era 400 K, qual será sua temperatura ao fim da expansão sofrida?

P.177 Certa quantidade de gás perfeito deve ser levada de um estado inicial *A* para um estado final *B*. Há dois "caminhos" possíveis para isso. Pelo "caminho" **1** é realizada uma transformação isocórica seguida de uma isobárica; pelo "caminho" **2** é realizada uma transformação isobárica e em seguida uma isocórica, conforme indicado no gráfico.

a) Compare as temperaturas T_A e T_B dos estados inicial e final da massa gasosa.

b) Qual é a variação de energia interna do gás nos processos **1** e **2** descritos?

c) Quanto ao trabalho realizado nos dois processos, ele depende do "caminho" seguido? Em qual dos casos o trabalho tem módulo maior? Calcule esses trabalhos.

d) Em qual dos "caminhos" a quantidade de calor trocada tem maior módulo? Calcule essas quantidades de calor.

P.178 No gráfico, *A* e *B* são, respectivamente, os estados inicial e final de certa massa de gás perfeito. São representadas ainda as isotermas correspondentes às temperaturas T_A e T_B desses estados. Considere os seguintes processos entre os estados inicial e final:

1. transformação isobárica seguida de isocórica;
2. transformação isotérmica seguida de isocórica;
3. transformação isocórica seguida de isotérmica.

a) Qual das temperaturas é maior, T_A ou T_B? Por quê?

b) Sendo ΔU_1, ΔU_2 e ΔU_3 as variações de energia interna nos três processos, coloque-as em ordem crescente. Justifique.

c) Sendo $\mathcal{T}_1$, $\mathcal{T}_2$ e $\mathcal{T}_3$ os trabalhos realizados pelo gás nos três processos, coloque-os em ordem crescente. Justifique.

d) Sendo Q_1, Q_2 e Q_3 as quantidades de calor recebidas pelo gás nos três processos, coloque-as em ordem crescente. Justifique.

P.179 A temperatura de 2 mols de um gás perfeito aumenta de 300 K para 450 K, num processo adiabático. O calor molar sob pressão constante do gás vale 20,75 J/mol · K e a constante universal dos gases perfeitos é $R = 8{,}3$ J/mol · K. Determine a variação de energia interna sofrida pelo gás e o trabalho realizado no processo.

V2_P1_UN_D_CAP_09b.indd 192 22.08.09 10:25:12

5 Transformação cíclica. Conversão de calor em trabalho e de trabalho em calor

Ciclo ou **transformação cíclica** de uma dada massa gasosa é um conjunto de transformações após as quais o gás volta à mesma pressão, ao mesmo volume e à mesma temperatura que apresentava inicialmente. Em um ciclo, o estado final é igual ao estado inicial.

Sejam *A* e *C* dois estados de uma massa gasosa (**fig. 14**). Imaginemos que o gás passa de *A* para *C*, realizando uma expansão isobárica *AB* seguida de uma diminuição isocórica de pressão *BC*. O trabalho realizado τ_1 é dado pela área destacada no gráfico, sendo positivo ($\tau_1 > 0$).

Considere que, na volta de *C* para *A* (**fig. 15**), o gás realize uma compressão isobárica *CD* seguida de um aumento isocórico de pressão *DA*. O trabalho realizado τ_2 é dado pela área destacada no gráfico, sendo negativo ($\tau_2 < 0$).

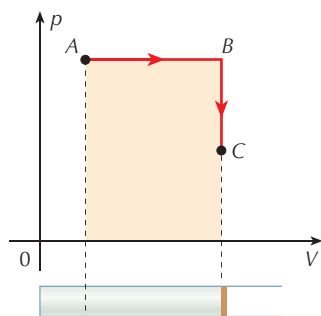



Figura 14. Expansão isobárica *AB* e transformação isocórica *BC*.

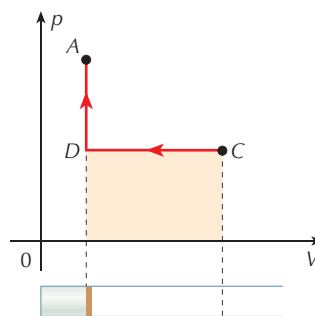



Figura 15. Compressão isobárica *CD* e transformação isocórica *DA*.

Considerando todo o ciclo *ABCDA*, o trabalho total realizado é dado pela soma algébrica dos trabalhos nas diferentes etapas do ciclo:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

Esse trabalho é, no caso, positivo, pois $|\tau_1| > |\tau_2|$, sendo dado numericamente pela área destacada na **figura 16**.

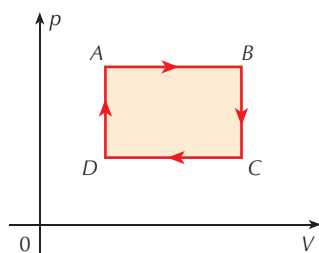



Figura 16. No ciclo *ABCDA*, a área destacada equivale numericamente ao trabalho realizado.

O calor trocado em todo o ciclo é também dado pela soma algébrica dos calores trocados em cada uma das etapas do ciclo:

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CD} + Q_{DA}$$

Como o estado inicial é igual ao estado final, é nula a variação de energia interna no ciclo:

$$U_{final} = U_{inicial} \Rightarrow \Delta U = 0$$

Aplicando a primeira lei da Termodinâmica, temos:

$$\Delta U = Q - \tau \Rightarrow 0 = Q - \tau \Rightarrow \boxed{\tau = Q}$$

No ciclo, há equivalência entre o calor total trocado Q e o trabalho total realizado τ.

No exemplo apresentado, o gás forneceu energia para o exterior, pois o trabalho total realizado é positivo (área do ciclo). No entanto, o gás recebeu calor do exterior em igual quantidade.

Perceba que houve a transformação de calor em trabalho pelo gás ao se completar o ciclo: ele recebeu calor e forneceu trabalho. Nas máquinas térmicas essa transformação é contínua, uma vez que os ciclos se repetem continuamente. No estudo da segunda lei da Termodinâmica, analisaremos o funcionamento de tais máquinas.

Se o ciclo fosse realizado em sentido contrário ao apresentado, isto é, *ADCBA*, ocorreria a conversão de trabalho em calor. Essa conversão ocorre nas máquinas frigoríficas.

De modo geral, se o ciclo for percorrido em sentido horário, há conversão de calor em trabalho (**fig. 17**). Se o ciclo for percorrido em sentido anti-horário, há conversão de trabalho em calor (**fig. 18**).

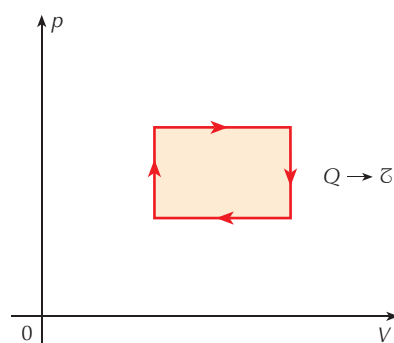



Figura 17. Ciclo em sentido horário: conversão de calor em trabalho.

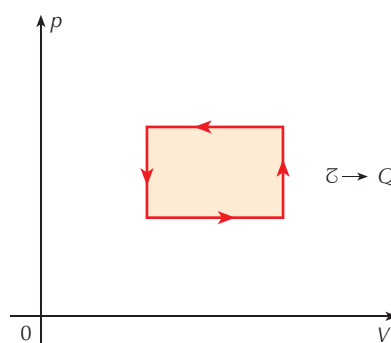



Figura 18. Ciclo em sentido anti-horário: conversão de trabalho em calor.

Ciclo em sentido horário: conversão de calor em trabalho ($Q \rightarrow Ꞇ$)
Ciclo em sentido anti-horário: conversão de trabalho em calor ($Ꞇ \rightarrow Q$)

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 60 O gráfico representa a transformação cíclica sofrida por um gás perfeito no sentido *ABCDA*.

Pergunta-se:

a) Há conversão de calor em trabalho ou de trabalho em calor? Por quê?

b) Qual é a quantidade de calor trocada no ciclo em questão? E o trabalho realizado?

Solução:

a) O trabalho na expansão *AB* tem módulo maior que o trabalho na compressão *CD* (o ciclo é percorrido em sentido horário). Logo, o trabalho realizado, dado pela área do ciclo, é positivo e representa energia perdida pelo gás para o exterior. O gás está recebendo uma quantidade de calor equivalente do meio exterior. Assim, a conversão é de calor em trabalho:

CALOR → TRABALHO

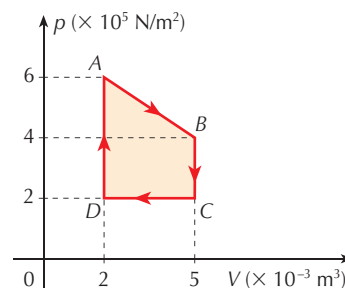
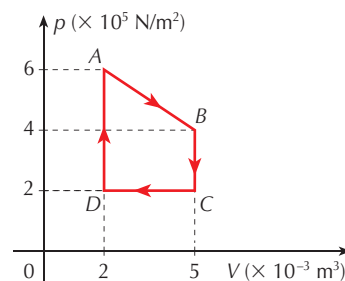
b) A área do trapézio destacado na figura corresponde numericamente ao trabalho realizado na transformação cíclica. Assim:

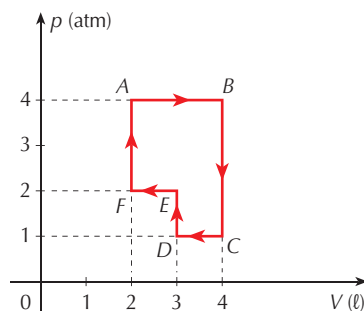
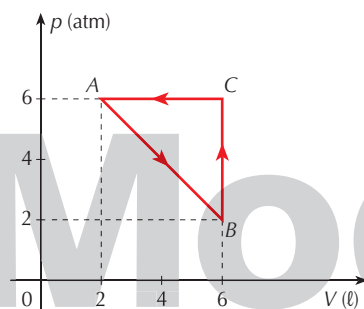
$$Ꞇ = \frac{4 \cdot 10^5 + 2 \cdot 10^5}{2} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \boxed{Ꞇ = 9 \cdot 10^2 \text{ J}}$$

No ciclo não há variação de energia interna:

$$\Delta U = 0 \Rightarrow \Delta U = Q - Ꞇ \Rightarrow 0 = Q - Ꞇ \Rightarrow Ꞇ = Q$$

Portanto: $\boxed{Q = 9 \cdot 10^2 \text{ J}}$

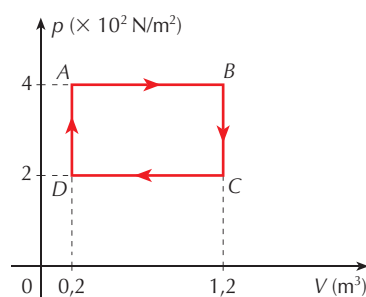
Respostas: a) Conversão: $Q \rightarrow Ꞇ$; b) $9 \cdot 10^2$ J e $9 \cdot 10^2$ J

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P.180 Um gás perfeito sofre uma série de transformações, passando pelos estados representados pelos pontos *A*, *B*, *C*, *D*, *E* e *F*, voltando ao estado *A*, como indica o diagrama.
Sendo 1 atm = 10^5 N/m^2 e 1 ℓ = 10^{-3} m^3, qual é o trabalho realizado, expresso em joules?

P.181 Um gás perfeito realiza o ciclo esquematizado no diagrama de trabalho no sentido *ABCA*. Determine o trabalho realizado e o calor trocado no processo, indicando se há conversão de calor em trabalho ou vice-versa.
(dados: 1 atm = 10^5 N/m^2 e 1 ℓ = 10^{-3} m^3)

P.182 Uma certa quantidade de gás ideal realiza o ciclo esquematizado no gráfico ao lado.

a) Calcule o trabalho realizado em cada uma das fases do ciclo (*AB*, *BC*, *CD* e *DA*), indicando se foi realizado pelo gás ou sobre o gás.

b) Em quais transformações há aumento da energia interna e em quais delas há diminuição? Justifique.

c) Ao completar cada ciclo, há conversão de calor em trabalho ou de trabalho em calor? Por quê?

d) Calcule a quantidade de calor e de trabalho que se interconvertem em cada ciclo.

P.183 Admita que o ciclo do exercício anterior seja utilizado em uma máquina, de modo que o gás realize quatro ciclos em cada segundo. Qual é a potência dessa máquina?

P.184 A figura ao lado representa o ciclo *ABCA* realizado por certa massa de gás ideal.

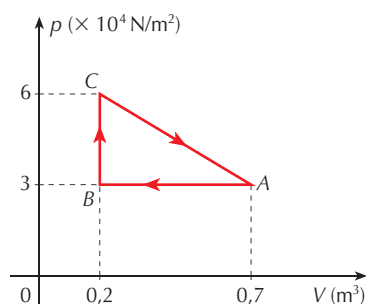
a) Calcule o trabalho realizado nas etapas *AB*, *BC* e *CA* do ciclo.

b) Qual conversão energética ocorre ao final de cada ciclo: de calor em trabalho ou de trabalho em calor? Por quê?

c) Calcule a energia convertida.

d) Se uma máquina que funciona com base nesse ciclo realiza 8 ciclos pelo gás em 5 s, qual é a potência da máquina?

Seção 9.4

A conversão de calor em trabalho

Objetivos

- Conceituar transformações reversíveis e irreversíveis.
- Analisar a probabilidade de ocorrência de transformações recíprocas em fenômenos cotidianos.
- Enunciar a segunda lei da Termodinâmica.
- Compreender as relações entre calor e trabalho nas máquinas térmicas.
- Avaliar o rendimento de uma máquina térmica e a eficiência de uma máquina frigorífica.
- Explicar o ciclo de Carnot.
- Compreender a impossibilidade de atingir o zero absoluto.

Termos e conceitos

- **rendimento de uma máquina térmica**
- **eficiência de uma máquina frigorífica**
- **termômetro legal**

1 Transformações reversíveis e transformações irreversíveis

Chamamos de **reversíveis** as transformações que podem se efetuar em ambos os sentidos, de modo que, na volta, o sistema retorna ao estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários, sem que ocorram variações definitivas nos corpos que o rodeiam.

Geralmente as transformações puramente mecânicas, que se realizam sem atritos e sem que se produzam choques inelásticos, são reversíveis, como no exemplo ilustrado na **figura 19**.

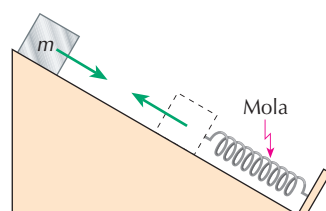



Figura 19. Descida reversível de um cubo num plano inclinado.

Considere um cubo de massa *m* no alto de um plano inclinado e, na base do plano, uma mola tida como ideal. Se deslizar sem nenhuma resistência plano abaixo, o cubo irá chocar-se elasticamente com a mola e voltará a subir pelo plano até alcançar novamente sua posição inicial. Perceba que a transformação ocorrida não produziu nenhuma modificação nos corpos circundantes. Logo, a descida é reversível.

No exemplo anterior, levando-se em conta as perdas de energia por atrito, para fazer o cubo retornar à posição primitiva, seria necessário um fornecimento exterior de energia. Nesse caso, a descida seria irreversível.

Uma transformação é dita **irreversível** quando sua inversa só puder se efetuar como parte de um processo mais complexo, envolvendo interações com outros corpos.

Durante uma transformação, um gás não está em equilíbrio, pois suas diferentes partes não apresentam a mesma temperatura e a mesma pressão. Em consequência, as relações que apresentamos, como as leis dos gases, não são aplicáveis. No entanto, se a transformação for realizada lentamente, há uniformização de pressão e temperatura no sistema e no meio exterior. Nesse caso, em todo instante são válidas as relações entre pressão, volume e temperatura. Tal transformação é dita **quase-estática** ou **reversível**, pois o processo poderá ser invertido e o gás poderá voltar ao estado inicial, passando pelos mesmos estados intermediários, sem que ocorram modificações no meio exterior.

2 Segunda lei da Termodinâmica

Em todas as transformações naturais, as conversões energéticas são tais que a energia total permanece constante, de acordo com o princípio da conservação da energia. A primeira lei da Termodinâmica é uma reafirmação desse princípio, mas não se refere à possibilidade de uma dada transformação se realizar efetivamente. Podemos imaginar muitos eventos que satisfazem a primeira lei da Termodinâmica e que são impossíveis na prática, ou melhor, a ocorrência de tais eventos é altamente improvável.

Um pêndulo oscilando, por exemplo, para ao fim de algum tempo, em virtude dos choques com as moléculas do ar e outros atritos. A energia "organizada" do pêndulo se converte em energia térmica. A primeira lei não invalida a transformação recíproca, em que as moléculas se organizam e empurram o pêndulo, fazendo-o recuperar a energia inicial. No entanto, a probabilidade da ocorrência de tal evento é ínfima.

Outro exemplo: o calor passa espontaneamente de um corpo de maior temperatura para outro de menor temperatura (**fig. 20A**). No entanto, a passagem contrária é altamente improvável, razão pela qual consideramos que não ocorre (**fig. 20B**).

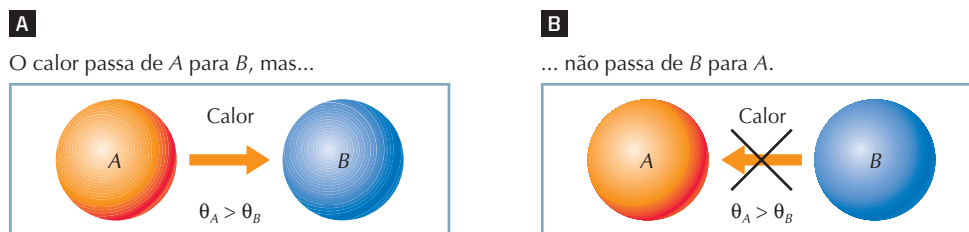



Figura 20. **O calor passa espontaneamente do corpo mais quente para o corpo mais frio.**

Ainda outro exemplo: uma gota de tinta colocada num líquido (**fig. 21**) se espalha uniformemente por ele, de maneira espontânea. Mas é quase impossível que as moléculas se reagrupem, restaurando a gota inicial.

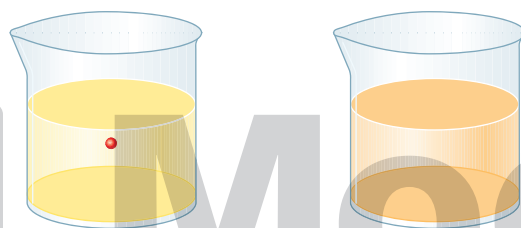



Figura 21. **A gota de tinta se difunde pelo líquido, tingindo-o uniformemente.**

Note, portanto, que o comportamento da Natureza é assimétrico. A lei que descreve tal comportamento é a segunda lei da Termodinâmica. De caráter estatístico, essa lei exprime o fato de que os sistemas evoluem espontaneamente, segundo um sentido preferencial, tendendo a um estado de equilíbrio.

De acordo com a segunda lei da Termodinâmica, a energia se "degrada" de uma forma organizada para uma forma desordenada chamada **energia térmica**, nas transformações naturais, como vimos no exemplo do pêndulo. Ainda conforme essa lei, a energia térmica passa de regiões mais quentes para regiões mais frias.

A transferência preferencial de calor do corpo mais quente para o corpo mais frio levou Clausius* a enunciar a segunda lei do seguinte modo:

> O calor não passa espontaneamente de um corpo para outro de temperatura mais alta.

Lorde Kelvin (1824-1907) e Max Planck (1848-1947) enunciaram a segunda lei da Termodinâmica de outra maneira, considerando que a conversão integral de calor em trabalho, embora prevista pela primeira lei, nunca pode ocorrer:

> É impossível construir uma máquina, operando em ciclos, cujo único efeito seja retirar calor de uma fonte e convertê-lo integralmente em trabalho.

* **CLAUSIUS**, Rudolf (1822-1888), físico alemão, notável por seus trabalhos sobre a teoria cinética dos gases e a Termodinâmica. Introduziu o conceito de entropia em Termodinâmica.

3 Conversão de calor em trabalho: máquina térmica

Vimos que, quando um sistema (por exemplo, um gás) realiza um ciclo em sentido horário no diagrama de trabalho, há transformação de calor em trabalho (página 194). Todavia, não é possível o sistema retirar calor de uma única fonte e convertê-lo completamente em trabalho, pois isso contraria a segunda lei.

As **máquinas térmicas**, como por exemplo a máquina a vapor, foram inventadas e funcionavam antes que seu princípio teórico fosse estabelecido.

Estudando essas máquinas, **Carnot*** evidenciou que uma diferença de temperatura era tão importante para uma máquina térmica quanto uma diferença de nível d'água para uma máquina hidráulica. Estabeleceu, então, que:

> Para que uma máquina térmica converta calor em trabalho de modo contínuo, deve operar em ciclo entre duas fontes térmicas, uma quente e outra fria: a máquina retira calor da fonte quente (Q_1), converte-o parcialmente em trabalho (τ) e rejeita o restante (Q_2) para a fonte fria.

Na **figura 22** representa-se esquematicamente uma máquina térmica, sendo: Q_1 o calor retirado da fonte quente (T_1), τ o trabalho útil obtido e Q_2 o calor rejeitado à fonte fria (T_2).

O rendimento dessa máquina térmica pode ser expresso pela razão entre a energia útil (trabalho) e a energia total representada pelo calor retirado da fonte quente (Q_1):

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia total}} \Rightarrow \boxed{\eta = \frac{\tau}{Q_1}}$$

Como $\tau = Q_1 - Q_2$, temos: $\eta = \dfrac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}}$

Nas fórmulas acima, as quantidades de calor foram consideradas em módulo.

T_1 Q_1 Fonte quente
$T_1 > T_2$ τ
T_2 Q_2 Fonte fria

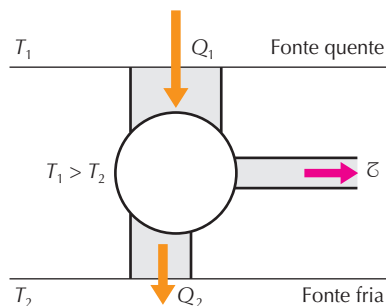



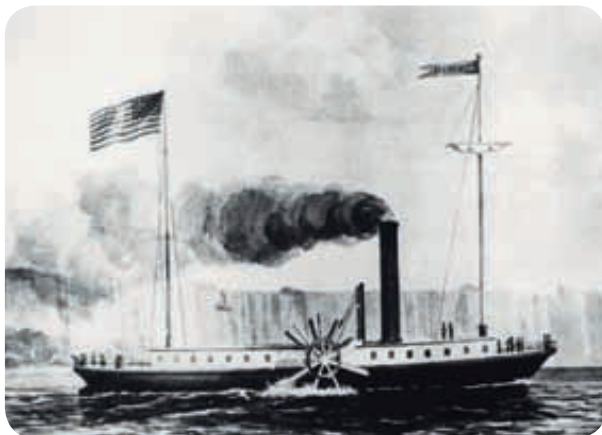
Figura 22. Esquema de uma máquina térmica.

Uma máquina térmica bem conhecida é a locomotiva a vapor (maria-fumaça). Nessa máquina, a fonte quente é a caldeira (fornalha), e a fonte fria é o ar atmosférico. O calor retirado da caldeira é parcialmente transformado no trabalho motor que aciona a máquina, e a diferença é rejeitada para a atmosfera.

Entre na rede No endereço eletrônico http://www.sciencemuseum.org.uk/on-line/energyhall/theme_See%20the%20engines%20at%20work.asp (acesso em agosto/2009), clique no *link* "See the Boulton and Watt rotative steam engine at work". Em seguida, clicando no botão "Next", você poderá observar cada detalhe do funcionamento da máquina de Watt.

* **CARNOT**, Nicolas Leonard Sadi (1796-1832), pioneiro do estudo da Termodinâmica, era filho de Lazare Carnot, ministro de Napoleão. Sua principal obra (1824) só foi apresentada à Academia de Ciências após sua morte prematura (aos 36 anos).

Observe que, para que a máquina funcione, deve existir sempre um sistema (geralmente gasoso) realizando ciclos continuamente. Esse sistema constitui a substância "trabalhante" da máquina. No caso da locomotiva a vapor, a substância "trabalhante" é o vapor-d'água.

As máquinas térmicas (ou motores térmicos) costumam apresentar rendimentos baixos, inferiores a 30%.

Reprodução de uma ilustração de época (1807) mostrando o Clermont, o primeiro barco a vapor do mundo, construído por Robert Fulton, navegando no Rio Hudson, EUA. Note que a propulsão era dada pela roda de pás que vemos na lateral do barco, a qual era acionada por uma máquina a vapor muito semelhante à das marias-fumaça.

Hoje, os maiores navios do mundo, como os superpetroleiros, são movidos por modernas turbinas a vapor, as quais acionam as hélices de propulsão (que trabalham submersas). Do ponto de vista econômico, o uso de motores no lugar das turbinas a vapor só é vantajoso em navios de pequeno porte.

4 Conversão de trabalho em calor: máquina frigorífica

Máquinas frigoríficas são dispositivos que, durante seu funcionamento, efetuam a transformação de trabalho em calor.

Os refrigeradores são máquinas frigoríficas que transferem calor de um sistema em menor temperatura (congelador) para o meio exterior, que se encontra a uma temperatura mais alta (**fig. 23**). Ao contrário do que possa parecer, porém, eles não contrariam o enunciado de Clausius da segunda lei, uma vez que a referida passagem não é espontânea: ela ocorre à custa de um trabalho externo (nas geladeiras, esse trabalho é feito pelo compressor). Na figura, Q_2 é a quantidade de calor retirada da fonte fria (T_2), $\mathcal{T}$ é o trabalho externo, e Q_1 é a quantidade de calor total rejeitada para a fonte quente (T_1).

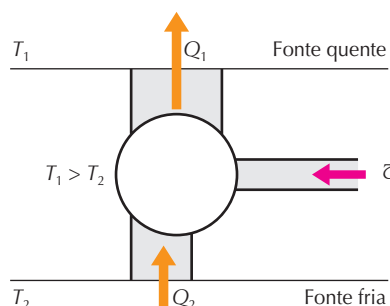



Figura 23. Máquina frigorífica.

A **eficiência** (e) de uma máquina frigorífica é expressa pela relação entre a quantidade de calor retirada da fonte fria (Q_2) e o trabalho externo envolvido nessa transferência ($\mathcal{T}$):

$$e = \frac{Q_2}{\mathcal{T}}$$

A eficiência é uma grandeza adimensional, isto é, não tem unidade.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 61 Uma caldeira, à temperatura de 600 K (fonte quente), fornece vapor, correspondente a 1.000 kcal em cada segundo, a uma turbina. O vapor, depois de passar pela turbina, cede ao condensador (fonte fria) 800 kcal por segundo a uma temperatura de 293 K. Considerando 1 cal = 4 J, determine a potência produzida por essa máquina em kW e calcule seu rendimento.

Solução:

Em um segundo, a máquina retira 1.000 kcal da fonte quente (caldeira) e devolve 800 kcal à fonte fria (condensador).

Assim:

$Q_1 = 1.000 \text{ kcal} = 1.000 \cdot 10^3 \cdot 4 \text{ J} = 4.000 \cdot 10^3 \text{ J} = 4.000 \text{ kJ}$

$Q_2 = 800 \text{ kcal} = 800 \cdot 10^3 \cdot 4 \text{ J} = 3.200 \cdot 10^3 \text{ J} = 3.200 \text{ kJ}$

A parcela que se transforma em trabalho útil é dada por:

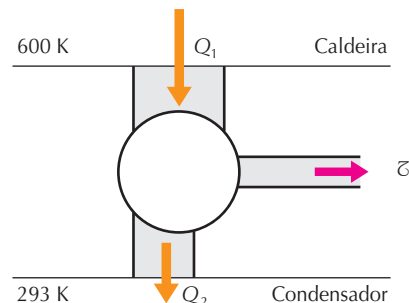
$$\mathcal{T} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow \mathcal{T} = 4.000 - 3.200 \Rightarrow \mathcal{T} = 800 \text{ kJ}$$

Como esse trabalho é produzido em um segundo, a potência *Pot* da máquina será:

$$Pot = \frac{\mathcal{T}}{\text{tempo}} \Rightarrow Pot = \frac{800 \text{ kJ}}{1 \text{ s}} \Rightarrow \boxed{Pot = 800 \text{ kW}}$$

O rendimento é dado por:

$$\eta = \frac{\mathcal{T}}{Q_1} \Rightarrow \eta = \frac{800}{4.000} \Rightarrow \boxed{\eta = 0{,}2 = 20\%}$$

Resposta: 800 kW; 0,2 ou 20%

R. 62 Numa máquina frigorífica, em cada ciclo do gás utilizado, são retirados 120 J do congelador. No processo a atmosfera (fonte quente) recebe 150 J. Determine:

a) o trabalho do compressor em cada ciclo;

b) a eficiência dessa máquina térmica.

Solução:

a) A atmosfera recebe $Q_1 = 150$ J por ciclo, enquanto do congelador é retirada a quantidade de calor $Q_2 = 120$ J. Então, o trabalho externo do compressor é dado pela diferença:

$$\mathcal{T} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow \mathcal{T} = 150 - 120 \Rightarrow \boxed{\mathcal{T} = 30 \text{ J}}$$

b) A eficiência da máquina frigorífica é dada por:

$$e = \frac{Q_2}{\mathcal{T}} \Rightarrow e = \frac{120}{30} \Rightarrow \boxed{e = 4{,}0}$$

Respostas: a) 30 J; b) 4,0

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 185 Em um segundo, o vapor fornece 1.600 kcal ao cilindro de uma máquina a vapor. Durante o mesmo tempo, são perdidas no escape 1.400 kcal. Calcule o rendimento térmico dessa máquina a vapor.

P. 186 Uma máquina térmica transforma em energia útil $\frac{1}{4}$ do calor que ela retira da fonte quente da máquina.

Se a potência útil da máquina vale 800 kW, qual é, por segundo:

a) a quantidade de calor retirada da fonte quente?

b) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria?

P. 187 Calcule o trabalho externo envolvido em cada ciclo e a eficiência de uma máquina frigorífica que retira 50 cal por ciclo do congelador, rejeitando para o ambiente 75 cal por ciclo (dado: 1 cal = 4,18 J).

5 Ciclo de Carnot

Em 1824, Carnot idealizou um ciclo que proporcionaria **rendimento máximo** a uma máquina térmica.

O ciclo de Carnot (**fig. 24**) consta de **duas transformações adiabáticas** alternadas com **duas transformações isotérmicas**, todas elas reversíveis, sendo o ciclo também reversível. Quando o ciclo é percorrido no sentido horário, o trabalho $\mathcal{T}$ realizado é positivo e medido numericamente pela área do ciclo.

Imagine uma máquina térmica, na qual o gás sofra expansões e compressões, realizando o ciclo de Carnot (**fig. 25**). Seja T_1 a temperatura da fonte quente e T_2 a temperatura da fonte fria.

Partindo do estado A, o gás realiza uma expansão isotérmica AB (**fig. 25A**), recebendo a quantidade de calor Q_1 da fonte quente. Em seguida ocorre a expansão adiabática BC (**fig. 25B**), durante a qual não há troca de calor. A compressão isotérmica CD (**fig. 25C**) se verifica à temperatura T_2 da fonte fria e, nessa etapa, o gás rejeita a quantidade de calor que não se converte em trabalho (Q_2). A compressão adiabática DA (**fig. 25D**), que completa o ciclo, se realiza sem troca de calor.

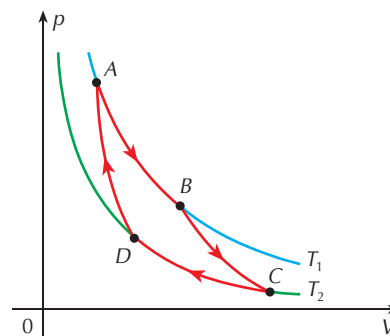



Figura 24. Ciclo de Carnot: *AB* e *CD* são isotérmicas; *BC* e *DA* são adiabáticas.

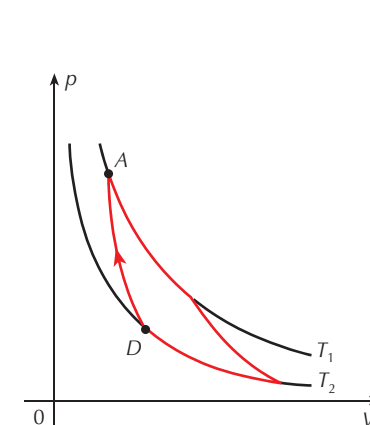
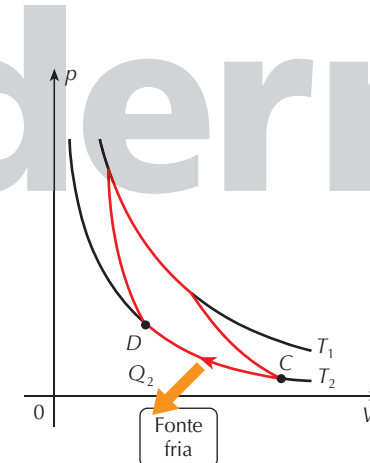
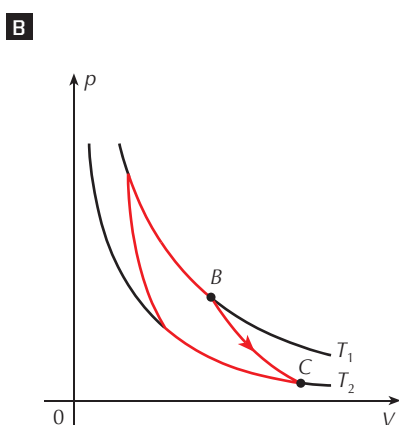
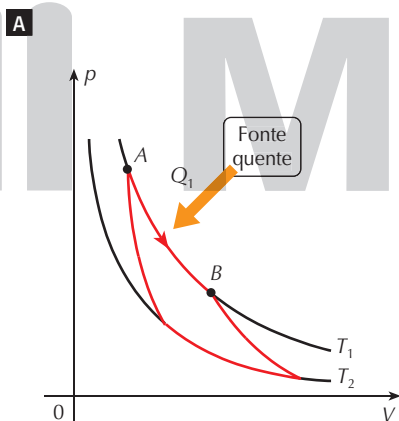
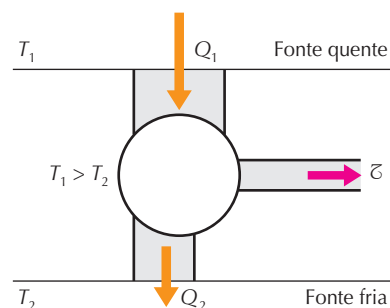



Figura 25. (A) Na expansão *AB*, o gás retira Q_1 da fonte quente; (B) na expansão *BC*, o gás não troca calor; (C) na compressão *CD*, o gás rejeita Q_2 para a fonte fria; (D) na compressão *DA*, o gás não troca calor.

Carnot demonstrou que, nesse ciclo, as quantidades de calor trocadas com as fontes quente e fria são proporcionais às respectivas temperaturas absolutas das fontes:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

O rendimento de uma máquina térmica que realiza o ciclo de Carnot (máquina de Carnot) pode então ser expresso por: $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$

Como $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$, temos: $$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Essa fórmula expressa uma importante conclusão:

> O rendimento no ciclo de Carnot é função exclusiva das temperaturas absolutas das fontes quente e fria, não dependendo, portanto, da substância "trabalhante" utilizada.

Por outro lado, Carnot provou que essa fórmula corresponde ao máximo rendimento que pode ser obtido por uma máquina térmica operando entre duas temperaturas T_1 (fonte quente) e T_2 (fonte fria).

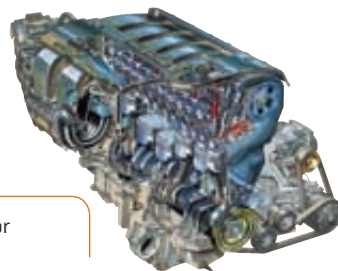
Máximo rendimento de uma máquina térmica

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Há ciclos teóricos reversíveis que podem ter rendimento igual ao do ciclo de Carnot, mas nunca maior.

Observe que o rendimento do ciclo de Carnot é o máximo possível para uma máquina térmica. No entanto, esse rendimento nunca pode alcançar 100% ($\eta = 1$), pois, para que isso ocorresse, a máquina deveria operar entre uma fonte quente e uma fonte fria à temperatura do zero absoluto ($\eta = 1 \Rightarrow T_2 = 0$ K), o que é irrealizável na prática. Tal máquina estaria contrariando a segunda lei da Termodinâmica, pois converteria integralmente calor em trabalho ($\eta = 1 \Rightarrow \tau = Q_1$).

Entre na rede No endereços eletrônicos (acesso em agosto/2009) http://www.galileo.fr.it/marc/termologia_e_termodinamica/carnot/Carnot_Engine.htm (em italiano) e http://subaru2.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/thermo/carnot.html (em francês), você pode acompanhar as transformações sofridas por um gás em uma simulação do ciclo de Carnot.

O motor de um automóvel realiza trabalho quando lhe é fornecido calor. Esses motores dispõem usualmente de quatro, seis ou mais cilindros e são constantemente aperfeiçoados, visando aumentar seu rendimento.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
A Física em nosso Mundo: *O motor à explosão do automóvel*

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 63 Certa máquina térmica ideal funciona realizando o ciclo de Carnot. Em cada ciclo o trabalho útil fornecido pela máquina é de 1.000 J. Sendo as temperaturas das fontes térmicas 127 °C e 27 °C, respectivamente, determine:

a) o rendimento da máquina referida;

b) a quantidade de calor retirada da fonte quente;

c) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria.

Solução:

a) O rendimento da máquina que realiza o ciclo de Carnot é dado por: $\eta = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$

Sendo: $T_2 = 27 + 273 \Rightarrow T_2 = 300$ K (fonte fria) $\quad T_1 = 127 + 273 \Rightarrow T_1 = 400$ K (fonte quente)

Logo, o rendimento vale:

$$\eta = 1 - \frac{300}{400} \Rightarrow \eta = 1 - 0{,}75 \Rightarrow \boxed{\eta = 0{,}25 = 25\%}$$

b) A outra fórmula do rendimento é:

$$\eta = \frac{\text{Energia útil}}{\text{Energia total}} = \frac{\mathcal{T}}{Q_1}$$

Aplicando essa fórmula, obtemos:

$$Q_1 = \frac{\mathcal{T}}{\eta} \Rightarrow Q_1 = \frac{1.000}{0{,}25} \Rightarrow \boxed{Q_1 = 4.000 \text{ J}}$$

c) A quantidade de calor rejeitada para a fonte fria será:

$$\mathcal{T} = Q_1 - Q_2 \Rightarrow Q_2 = Q_1 - \mathcal{T} \Rightarrow Q_2 = 4.000 - 1.000 \Rightarrow \boxed{Q_2 = 3.000 \text{ J}}$$

Respostas: a) 0,25 (ou 25%); b) 4.000 J; c) 3.000 J

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 188 Calcule o rendimento de uma máquina de Carnot que trabalha entre as temperaturas de 27 °C e 327 °C.

P. 189 (PUC-RJ) Uma máquina de Carnot é operada entre duas fontes, cujas temperaturas são, respectivamente, 100 °C e 0 °C. Admitindo-se que a máquina recebe da fonte quente uma quantidade de calor igual a 1.000 cal por ciclo, pede-se:

a) o rendimento térmico da máquina;

b) o trabalho realizado pela máquina em cada ciclo (expresso em joules);

c) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria.

(Dado: 1 cal = 4,18 J)

P. 190 Uma máquina térmica trabalha entre as temperaturas de 127 °C e 327 °C. Em cada ciclo a substância "trabalhante" dessa máquina retira 200 J de calor da fonte quente e rejeita 160 J de calor para a fonte fria.

a) Qual é a energia útil obtida nessa máquina por ciclo?

b) Determine o rendimento dessa máquina.

c) Qual seria o máximo rendimento dessa máquina com as temperaturas entre as quais opera?

P. 191 (Mackenzie-SP) Um motor térmico funciona segundo o ciclo de Carnot. A temperatura da fonte quente é 400 K e da fonte fria é 300 K. Em cada ciclo o motor recebe 600 cal da fonte quente. Determine:

a) o rendimento desse motor;

b) a quantidade de calor rejeitada para a fonte fria em cada ciclo.

P. 192 Um inventor informa ter construído uma máquina térmica que recebe, em certo tempo, 10^5 cal e fornece, ao mesmo tempo, $5 \cdot 10^4$ cal de trabalho útil. A máquina trabalha entre as temperaturas de 177 °C e 227 °C.

a) Que rendimento tem a máquina que o inventor alega ter construído?

b) Comente a possibilidade de essa máquina existir.

6 Escala Kelvin termodinâmica

Ao definirmos as escalas termométricas (Capítulo 2 – Termometria), foi necessário efetuar uma escolha arbitrária e convencional de um corpo termométrico e de uma grandeza termométrica, estabelecendo uma função do 1º grau entre a temperatura e a grandeza termométrica. Entretanto, essa definição apresenta limitações e, muitas vezes, os resultados obtidos não correspondem aos valores reais.

Como o rendimento de uma máquina de Carnot não depende da natureza do agente térmico, podemos definir a escala absoluta de temperaturas de modo mais rigoroso, segundo proposta de Kelvin em 1848.

A máquina de Carnot pode ser considerada um verdadeiro **termômetro energético**, em que a *grandeza termométrica* é a quantidade de calor trocada com as fontes quente e fria (**fig. 26**).

No ciclo de Carnot, temos: $\dfrac{Q_1}{T_1} = \dfrac{Q_2}{T_2}$

Figura 26.

A **escala Kelvin termodinâmica** é a escala obtida nesse termômetro teórico constituído por uma máquina de Carnot. Nessa escala, adota-se como temperatura de referência a do ponto triplo da água, estado térmico onde coexistem gelo, água líquida e vapor-d'água em equilíbrio (veja Capítulo 6, página 100). A esse estado térmico corresponde, para a temperatura, o valor 273,16 K.

Desse modo, seja T_T = 273,16 K a temperatura da fonte quente e T a temperatura da fonte fria, que corresponde à temperatura que se deseja determinar* (**fig. 27**). A função termométrica da escala Kelvin termodinâmica será:

$$\frac{Q_T}{T_T} = \frac{Q}{T}$$

Mas: T_T = 273,16 K; logo: $\dfrac{Q_T}{273{,}6} = \dfrac{Q}{T} \Rightarrow \boxed{T = 273{,}16\,\dfrac{Q}{Q_T}}$

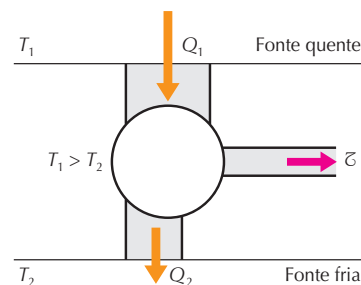
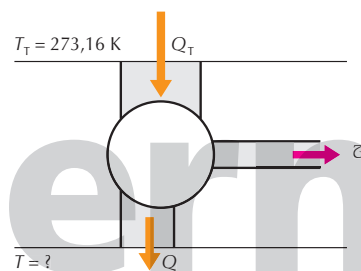



Figura 27. **A escala absoluta termodinâmica é definida por meio de uma máquina de Carnot.**

A escala Kelvin termodinâmica é de realização prática impossível, pois a máquina de Carnot é ideal. O termômetro cujas indicações mais se aproximam do termômetro energético descrito é o **termômetro de gás a volume constante**, denominado **termômetro legal**.

Observação

Adotando o zero absoluto (0 K) como a temperatura da fonte fria de uma máquina de Carnot, e sendo o rendimento dado por $\eta = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$, teremos:

$$T_2 = 0\text{ K} \Rightarrow \eta = 1 \text{ (isto é, 100\%)}$$

O zero absoluto ou zero kelvin (0 K) é a temperatura da fonte fria de uma máquina de Carnot que apresenta rendimento 100% (isto é, $\eta = 1$).

Como uma máquina térmica com 100% de rendimento converte integralmente calor em trabalho, contrariando a segunda lei da Termodinâmica, concluiu-se que o **zero absoluto é inatingível**.

Apesar de o zero absoluto (0 K) ser irrealizável, pesquisas recentes já tornaram possível atingir temperaturas incrivelmente baixas, como a obtida por uma equipe do MIT: $450 \cdot 10^{-12}$ K, isto é, 0,000000000450 K!

* Se a temperatura a ser determinada for maior que a temperatura do ponto triplo ($T > T_T$), T_T passa a ser a temperatura da fonte fria.

Seção 9.5

Princípio da degradação da energia

Objetivos

- Compreender que no universo há uma tendência natural para o estado de maior desordem.
- Conceituar entropia.
- Relacionar a variação da entropia com a quantidade de calor e a temperatura em um sistema.
- Conhecer a unidade de medida de entropia.

Termos e conceitos

- **entropia**
- **função de estado**

As transformações naturais ocorrem preferencialmente num sentido, caracterizando-se pela irreversibilidade. Embora ocorra sempre conservação da energia, **à medida que o Universo evolui, diminui a possibilidade de se conseguir energia útil ou trabalho de um sistema.**

Se tivermos dois corpos inicialmente a temperaturas diferentes, poderemos aproveitar essa diferença de temperatura por meio de uma máquina térmica e obter trabalho. No entanto, se os corpos forem colocados em contato térmico, o calor passa espontaneamente do corpo mais quente para o corpo mais frio, até o equilíbrio térmico. Com isso, deixa de haver diferença de temperatura entre os corpos e estes perdem a capacidade de produzir trabalho.

Todas as formas de energia (mecânica, elétrica, química, nuclear) tendem a se converter espontânea e integralmente em energia de agitação térmica — uma forma desordenada de energia. A transformação inversa, embora possível (máquinas térmicas), se dá com baixo rendimento.

Há ainda a tendência de se estabelecer o equilíbrio térmico, reduzindo a possibilidade de transformação da energia térmica em outras formas de energia. Por isso a energia térmica é denominada energia degradada, sendo possível considerar a **segunda lei da Termodinâmica** como o **princípio da degradação da energia**.

Desordem e entropia

Coloquemos, num recipiente, cem esferas vermelhas na parte de baixo e cem esferas azuis sobre elas. Fechando o recipiente e agitando-o, as esferas irão se misturar. Seria possível voltarmos à situação inicial, com todas as esferas vermelhas embaixo e todas as azuis em cima? Pela lei das probabilidades, não é impossível, mas é um evento de baixíssima probabilidade, isto é, altamente improvável. Talvez tivéssemos de agitar o recipiente durante milhões de anos sem conseguir o desejado.

Tomemos agora um baralho em que as cartas estejam ordenadas por naipes e por valores. Ao embaralharmos as cartas, elas irão se misturar e se distribuir ao acaso. Será possível que, após um grande número de embaralhamentos, as cartas voltem a se ordenar? Impossível não é, mas é altamente improvável.

Os fenômenos naturais são irreversíveis exatamente por se realizarem sempre no sentido dos estados mais prováveis. Por isso mesmo, nos processos naturais, há sempre a passagem espontânea de um estado ordenado para um estado desordenado.

Se ligarmos dois recipientes, um com nitrogênio e outro com hélio, os gases irão se misturar espontaneamente, ocorrendo uma distribuição mais ou menos uniforme dos dois gases nos recipientes. É altamente improvável, embora não impossível, que, sem a ação de nenhum agente externo, os gases se separem novamente, voltando à ordem inicial.

A degradação natural da energia também é uma evolução para a desordem. As energias ordenadas (mecânica, elétrica, química) tendem a se converter na energia desordenada de agitação térmica.

Sendo assim, podemos enunciar:

> Em todos os fenômenos naturais, a tendência é a evolução para um estado de maior desordem.

Ao conceito estatístico de desordem Clausius associou o conceito matemático de **entropia**. Assim, a entropia é uma propriedade intrínseca dos sistemas, caracterizada pelo fato de seu valor aumentar quando aumenta a desordem nos processos naturais. Nessa perspectiva, podemos afirmar:

> As transformações naturais sempre levam a um aumento na entropia do Universo.

A **variação de entropia** pode ser entendida como **a medida da indisponibilidade da energia do sistema** em sua evolução natural. De fato, o sistema evolui no sentido de diminuir a possibilidade de se conseguir energia útil ou trabalho dele.

Quando ocorre uma transformação natural, outras formas de energia se convertem em calor. Portanto, aumenta a indisponibilidade da energia total do sistema e aumenta sua entropia. Assim, podemos dizer que a quantidade de calor Q que se desenvolve no sistema é uma medida parcial de seu aumento de entropia.

Por outro lado, a possibilidade de se obter trabalho a partir de determinada quantidade de calor Q depende da temperatura T em que essa quantidade é trocada.

Imagine duas máquinas de Carnot que retirem da fonte quente a mesma quantidade de calor Q (**fig. 28**). Suponha que a fonte quente da primeira esteja a uma temperatura (T_1) maior que a da fonte quente da segunda (à temperatura T_1'). Seja T_2 a temperatura da fonte fria de ambas.

Os rendimentos são dados por: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ e $\eta' = 1 - \frac{T_2}{T_1'}$

Como $T_1 > T_1'$, temos: $\eta > \eta'$ Mas: $\eta = \frac{\mathcal{T}}{Q}$ e $\eta' = \frac{\mathcal{T}'}{Q}$ Portanto: $\mathcal{T} > \mathcal{T}'$

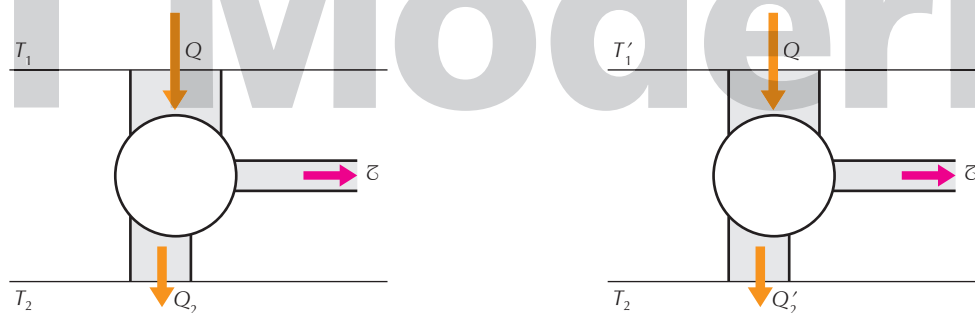



Figura 28. **Obtém-se mais trabalho ($\mathcal{T} > \mathcal{T}'$) da máquina em que a fonte quente está a uma maior temperatura.**

Assim, da mesma quantidade de calor Q obtém-se mais trabalho quando a troca é realizada em temperatura mais alta. Então, a incapacidade de realizar trabalho é tanto maior quanto menor a temperatura do sistema.

Seja Q a quantidade de calor que o sistema troca e T a temperatura dele durante uma transformação isotérmica reversível. Define-se a variação de entropia ΔS do sistema, nesse processo, pela relação:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

A unidade de variação de entropia no Sistema Internacional de Unidades é o **joule por kelvin** (símbolo: J/K).

A **variação de entropia** ΔS, do mesmo modo que a variação de energia interna ΔU, é uma **função de estado**, dependendo apenas dos estados inicial e final do sistema, e não das particulares transformações que levam o sistema de um estado ao outro.

Essa definição foi estabelecida para um processo reversível. Numa transformação natural irreversível, a medida da variação da entropia é feita de modo indireto, como mostramos a seguir, na expansão livre de um gás.

A

B

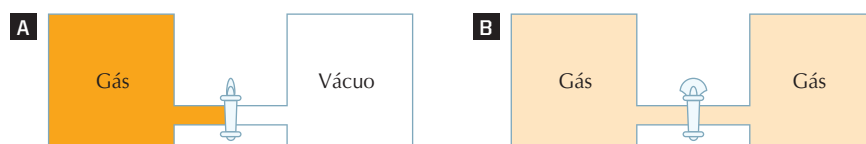
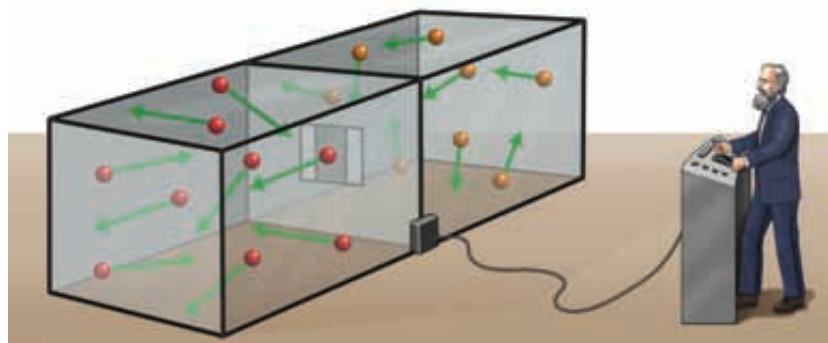



Figura 29. Na expansão livre de um gás perfeito, há aumento de entropia.

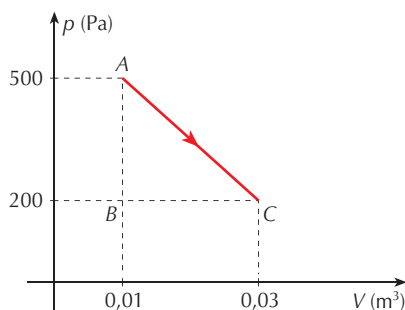
Imaginemos um sistema, termicamente isolado do meio exterior, constituído por dois recipientes, inicialmente separados, como mostra a **figura 29A**: em um deles, há um gás perfeito, e no outro, vácuo. Retirando-se a separação, o gás se expande, passando a ocupar também o segundo recipiente (**fig. 29B**). A transformação ocorrida é adiabática ($Q = 0$) e não há realização de trabalho ($\mathcal{T} = 0$), pois não houve resistências contra a expansão do gás. Pela primeira lei da Termodinâmica, a variação de energia interna também é nula ($\Delta U = \mathcal{T} - Q = 0$), não havendo, portanto, variação de temperatura (o processo é isotérmico). Note que o gás, ao se expandir, realiza uma transformação irreversível e, em consequência, diminui sua capacidade de realizar trabalho. A entropia do sistema aumenta.

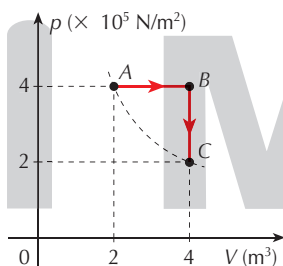
Para medir esse aumento de entropia, imaginemos um processo reversível inverso, isto é, que leve o sistema do estado final de volta ao estado inicial. Para isso, deveria ser realizado um trabalho $\mathcal{T}$ sobre o gás e, considerando o processo isotérmico, o gás deveria perder uma equivalente quantidade de calor Q. Como a temperatura T é constante, há nessa transformação uma diminuição de entropia ΔS dada por $\Delta S = \frac{Q}{T}$. Sendo a variação de entropia uma função de estado, só dependendo dos estados inicial e final, o módulo do ΔS calculado equivale ao aumento da entropia ocorrido na expansão.

O demônio de Maxwell

O célebre físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) formulou, em 1871, um experimento teórico que violaria a segunda lei da Termodinâmica, indicando o caráter estatístico do conceito de entropia proposto por Clausius em 1864. Ele imaginou um ser microscópico inteligente que teria a capacidade de, por meio de uma portinhola entre dois recipientes contendo gás, controlar a passagem das moléculas, só deixando passar as moléculas rápidas num sentido e só as moléculas lentas em sentido contrário. Com isso, ele conseguiria, ao fim de certo tempo, ter, de um lado, apenas as moléculas rápidas (e portanto gás numa temperatura mais elevada) e, do outro, apenas as moléculas lentas (e portanto gás numa temperatura mais baixa). Esse ser hipotético, conhecido como *demônio de Maxwell*, estaria, sem dispêndio de energia, ordenando o sistema e, consequentemente, diminuindo sua entropia, contrariando a tendência natural para a desordem, isto é, para o aumento da entropia.

Conteúdo digital Moderna PLUS http://www.modernaplus.com.br
História da Física: *O desenvolvimento da Termodinâmica*

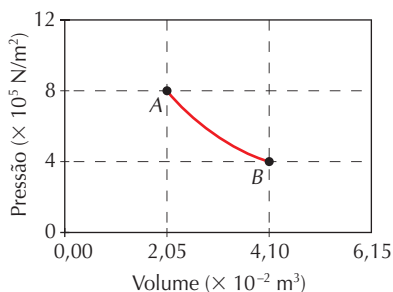
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 193 (UnB-DF) No diagrama a seguir, a energia interna do sistema em joules é dada por $U = 10 + 2\,pV$, em que p é a pressão, em Pa, e V, o volume, em m^3. Calcule, em joules, a quantidade de calor envolvida no processo AC.

P. 194 (UFRRJ) A figura representa o gráfico $p \times V$ de um gás, suposto ideal, que sofre primeiramente um processo isobárico, partindo do ponto A para o ponto B, e depois um processo isovolumétrico, atingindo o ponto C, que se situa sobre a mesma isoterma que A.

p ($\times$ 10^5 N/m²); 4; 2; A; B; C; 0; 2; 4; V (m³)

Calcule:

a) o trabalho realizado pelo gás ao final do processo *ABC*;

b) o calor recebido pelo gás ao final do processo *ABC*.

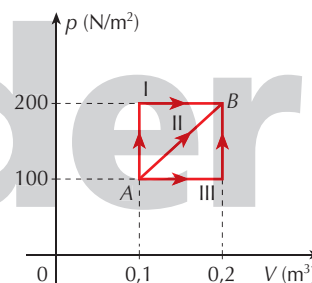
P. 195 (UFJF-MG) Um recipiente de volume 0,0205 m³ contém uma massa de 0,640 kg de oxigênio sob pressão de $8{,}00 \times 10^5$ N/m². O volume do sistema é dobrado através de um processo termodinâmico isotérmico, como mostra o gráfico da figura.

a) Sabendo-se que o oxigênio se comporta como um gás ideal de massa molar $M = 32$ g/mol, calcule a temperatura T do sistema (dado: $R = 8{,}2$ J/mol · K).

b) Calcule o valor aproximado do trabalho realizado pelo sistema entre os pontos A e B, supondo que a isoterma é uma linha reta nessa região.

c) Indique o valor aproximado do calor ΔQ absorvido pelo sistema no processo de expansão isotérmica de A para B, justificando sua resposta.

P. 196 (ITA-SP) Uma certa quantidade de gás expande-se adiabaticamente e quase estaticamente desde uma pressão inicial de 2,0 atm e volume de 2,0 ℓ na temperatura de 21 °C até atingir o dobro de seu volume.

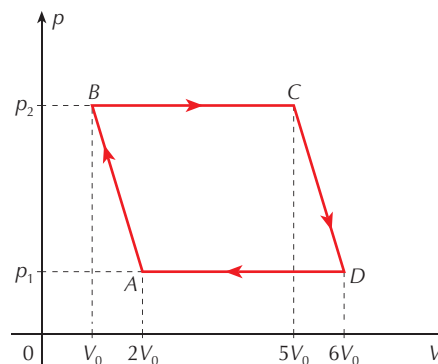
Sabendo-se que para esse gás $\gamma = \dfrac{C_p}{C_v} = 2{,}0$, calcule a pressão final e a temperatura final expressa em graus Celsius.

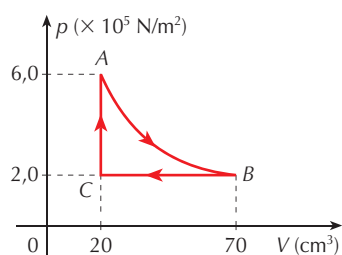
P. 197 (Ufla-MG) Um gás sofre uma série de transformações com estado inicial A e estado final B, como mostra a figura. A energia interna do estado A é $U_A = 1.000$ J e a do estado B é $U_B = 2.000$ J.

Calcule para cada uma das transformações indicadas:

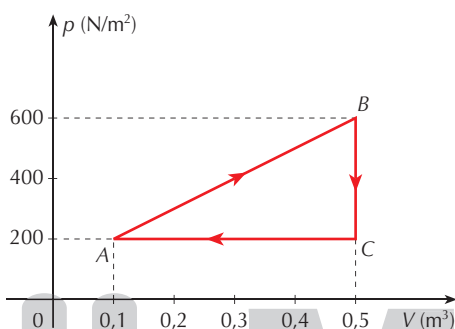
a) a variação da energia interna;

b) o trabalho realizado (diga também se foi feito pelo gás ou sobre o gás);

c) a quantidade de calor trocado.

P. 198 (UFC-CE) Um gás ideal sofre as transformações mostradas no diagrama.

Determine o trabalho total realizado durante os quatro processos termodinâmicos AB, BC, CD e DA.

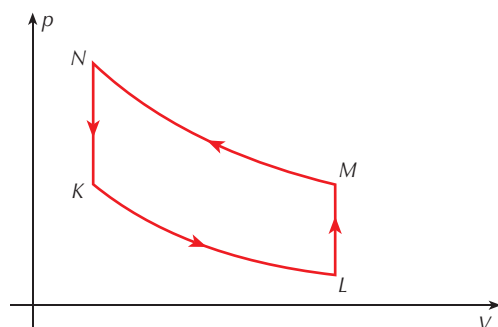
P. 199 (UFPE) Um gás ideal absorve 64 J de calor ao se expandir isotermicamente, de um volume inicial de 20 cm^3, a $6{,}0 \times 10^5$ N/m^2 até um volume final de 70 cm^3, a $2{,}0 \times 10^5$ N/m^2 (trecho *AB* do diagrama).

Qual é o trabalho total, em joules, produzido pelo gás durante o ciclo *ABCA*?

P. 200 (UFG-GO) Um gás sofre a transformação cíclica *ABCA* indicada no gráfico.

Determine:

a) a variação de energia interna;

b) o trabalho realizado pelo gás;

c) a quantidade de calor trocada em cada ciclo.

P. 201 (UFMG) A figura mostra o diagrama pressão *p versus* volume *V*, que representa as transformações sofridas por um gás ideal dentro de uma câmara. A sequência de transformações sofridas é *KLMN* e está indicada pelas setas. As transformações de *K* para *L* e de *M* para *N* se realizam sem variação da temperatura.

a) Indique, explicando seu raciocínio, o(s) trecho(s) em que:

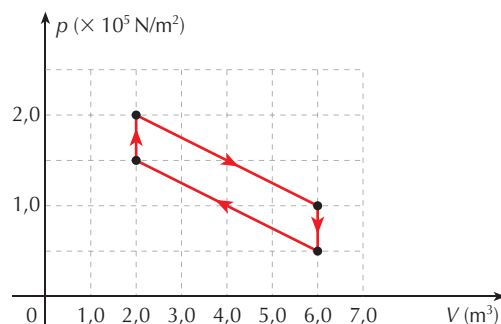
I. o gás realiza trabalho positivo;

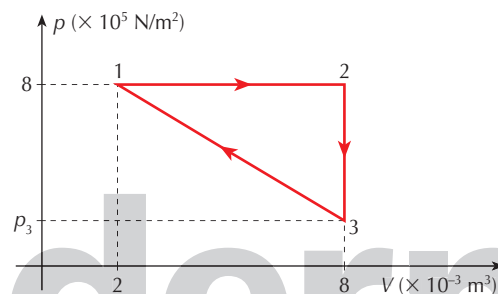
II. o gás absorve calor.

b) Responda e justifique sua resposta:

I. A temperatura no ponto *N* é maior, menor ou igual à temperatura no ponto *L*?

II. A sequência de transformações *KLMNK* corresponde ao ciclo de funcionamento de um motor ou de um refrigerador?

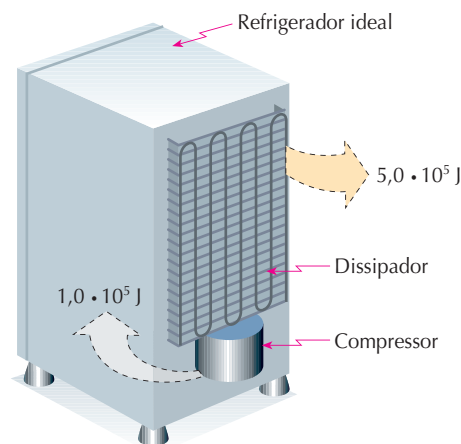
P. 202 (UFPE) A variação da pressão e do volume de vapor-d'água a cada ciclo de operação de uma máquina a vapor pode ser aproximada pelo gráfico abaixo.

Calcule o trabalho total em unidades 10^6 joules efetuado por essa máquina ao longo de 50 ciclos de operação.

P. 203 (Esal-MG) 0,32 mol de um gás diatômico ideal é submetido ao ciclo termodinâmico mostrado no gráfico, sendo $T_3 = 300{,}84$ K.

(Dados: $R = 8{,}31$ J/mol · K; $C_V = 20{,}775$ J/mol · K)

a) Calcular T_1, T_2 e p_3.

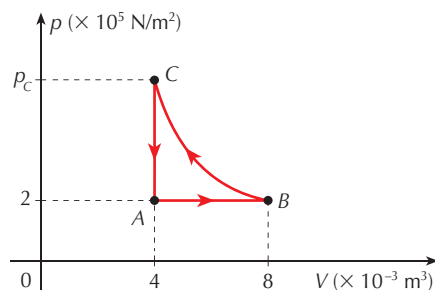
b) Calcular o trabalho líquido envolvido no ciclo.

c) Calcular a quantidade de calor envolvida no processo $3 \rightarrow 1$.

P. 204 Em um refrigerador ideal, o dissipador de calor (serpentina traseira) transferiu $5{,}0 \cdot 10^5$ J de energia térmica para o meio ambiente, enquanto o compressor produziu $1{,}0 \cdot 10^5$ J de trabalho sobre o fluido refrigerante.

Calcule:

a) a quantidade de calor retirada da câmara interna;

b) a temperatura da câmara interna, supondo que a temperatura ambiente fosse 30 °C.

P. 205 (Ufla-MG) O diagrama $p \times V$ abaixo mostra o ciclo de refrigeração percorrido por certa quantidade de um gás diatômico ideal. A transformação BC é isotérmica, na qual o trabalho envolvido, em módulo, é $\mathcal{T}_{BC} = 1.100$ J. O calor, em módulo, envolvido na transformação AB é $Q_{AB} = 2.800$ J e a temperatura no ponto A é $T_A = 300$ K.

Calcule os itens a seguir.

a) Temperatura T_B e pressão p_C.

b) Trabalho líquido envolvido no ciclo ABC.

c) Variação de energia interna na transformação AB.

P. 206 (Ufla-MG) Uma empresa propõe construir um motor térmico projetado para operar entre dois reservatórios de calor, sendo o quente a temperatura $T_1 = 1.600$ K e o frio a $T_2 = 400$ K. O projeto prevê para o motor uma potência de 4 cv com absorção de 1.480 cal/s do reservatório quente (dados: 1 cv = 740 W; 1 cal = 4 J).

a) Calcule o rendimento do referido motor.

b) Calcule o rendimento de um motor de Carnot operando entre os mesmos reservatórios de calor.

c) O motor proposto é viável teoricamente? Justifique sua resposta.

P. 207 (Unicamp-SP) Com a instalação do gasoduto Brasil-Bolívia, a quota de participação do gás natural na geração de energia elétrica no Brasil foi significativamente ampliada. Ao se queimar 1,0 kg de gás natural obtêm-se $5{,}0 \times 10^7$ J de calor, parte do qual pode ser convertido em trabalho em uma usina termoelétrica. Considere uma usina queimando 7.200 quilogramas de gás natural por hora, a uma temperatura de 1.227 °C. O calor não aproveitado na produção de trabalho é cedido para um rio de vazão 5.000 ℓ/s, cujas águas estão inicialmente a 27 °C. A maior eficiência teórica da conversão de calor em trabalho é dada por $\eta = 1 - \frac{T_{mín.}}{T_{máx.}}$ sendo $T_{mín.}$ e $T_{máx.}$ as temperaturas absolutas das fontes quente e fria, respectivamente, ambas expressas em kelvin. Considere o calor específico da água $c = 4.000$ J/kg · °C e a densidade $d = 1{,}0$ kg/ℓ.

a) Determine a potência gerada por uma usina cuja eficiência é metade da máxima teórica.

b) Determine o aumento de temperatura da água do rio ao passar pela usina.

TESTES PROPOSTOS

T. 175 (UFU-MG) Num recipiente A existe um determinado gás perfeito que se encontra no estado definido pelos valores p, V e T da pressão, do volume e da temperatura, respectivamente. Em um recipiente B um outro gás perfeito encontra-se no estado definido pelos valores p da pressão, $2V$ do volume e $2T$ da temperatura. Os dois gases têm o mesmo número de mols. Sejam respectivamente U_1 e U_2 as energias internas dos gases nos recipientes A e B.

A razão $\frac{U_1}{U_2}$ vale:

a) $\frac{1}{2}$

b) $\frac{3}{2}$

c) 6

d) $\frac{3}{4}$

e) 2

T. 176 (Vunesp) A energia interna U de uma certa quantidade de gás, que se comporta como gás ideal, contida em um recipiente, é proporcional à temperatura T, e seu valor pode ser calculado utilizando a expressão $U = 12{,}5T$. A temperatura deve ser expressa em kelvins e a energia, em joules. Se inicialmente o gás está à temperatura $T = 300$ K e, em uma transformação a volume constante, recebe 1.250 J de uma fonte de calor, sua temperatura final será:

a) 200 K

b) 300 K

c) 400 K

d) 600 K

e) 800 K

T. 177 (UFRGS-RS) Um recipiente cilíndrico fechado, provido de um êmbolo, contém certa quantidade de um gás ideal. À temperatura de 10 °C, o gás ocupa um volume V_0 e sua pressão é P. A partir desse estado inicial, o gás sofre uma expansão isobárica até atingir a temperatura de 20 °C.

A respeito da transformação descrita acima, é correto afirmar que:

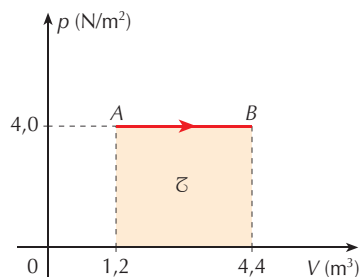
a) o gás passa a ocupar, depois da transformação, um volume igual a $2V_0$.

b) a energia cinética média final das moléculas do gás é igual ao dobro da sua energia cinética média inicial.

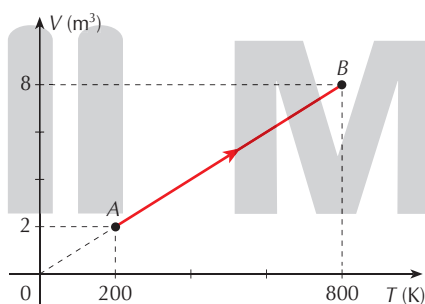
c) a velocidade média das moléculas do gás não varia quando o gás passa do estado inicial para o estado final.

d) a variação na energia interna do gás é nula na transformação.

e) o calor absorvido pelo gás, durante a transformação, é maior que o trabalho por ele realizado.

T. 178 (UEPB) Um gás encerrado por um cilindro com êmbolo móvel recebe de uma fonte térmica a quantidade de calor $\Delta Q = 8$ cal, submetido a uma pressão constante, provocando uma expansão isobárica desse gás, que varia seu volume, como mostra o gráfico.

Pode-se afirmar que a variação da energia interna desse gás de acordo com a primeira lei da Termodinâmica, considerando 1 cal = 4 J, vale:

a) 19,2 J
b) 10,4 J
c) 14,2 J
d) 12,6 J
e) 8,2 J

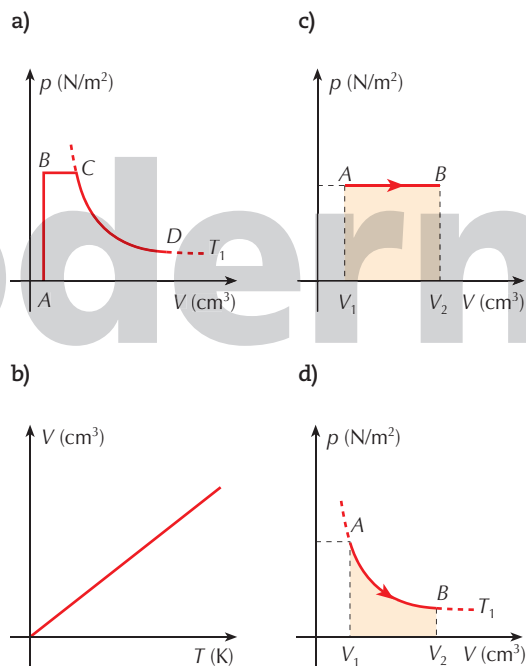
T. 179 (Unemat-MT) O gráfico abaixo mostra um gás ideal que se dilata isobaricamente sob pressão de 10 N/m^2.

Se o gás recebeu, durante o processo, 150 joules de calor, a variação da energia interna do gás e o trabalho realizado no processo são respectivamente iguais a:

a) 90 J e 60 J
b) 90 J e 80 J
c) 90 J e 40 J
d) 80 J e 120 J
e) 210 J e 60 J

T. 180 (Uepa) Um estudante verifica a ação do calor sobre um gás perfeito inserido em uma seringa de vidro, aquecendo-a com uma vela e mantendo fechada a sua saída (ver figura).

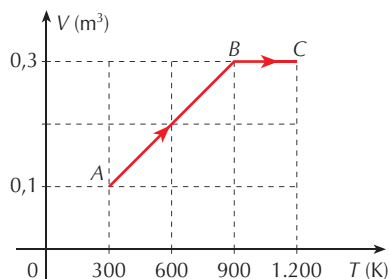
Desprezando-se o atrito entre o êmbolo da seringa e o vidro, pode-se afirmar que, durante o aquecimento:

a) o gás se tornará mais denso. Com isso, a pressão do ar atmosférico empurrará o êmbolo da seringa, comprimindo o gás.
b) se a pressão do gás se mantiver constante, a energia interna do sistema aumenta, fazendo com que o gás realize trabalho, deslocando o êmbolo da seringa.
c) se a pressão do gás se mantiver constante, o sistema gasoso recebe trabalho, diminuindo o volume interno da seringa.
d) se a energia interna do sistema aumenta, certamente o gás sofrerá uma transformação isométrica.
e) toda a energia recebida será integralmente utilizada para deslocar o êmbolo, tratando-se, portanto, de uma transformação isobárica do gás.

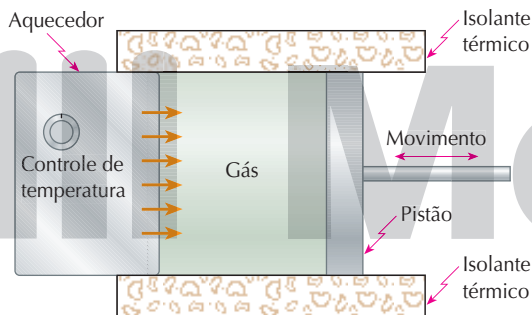
T. 181 (UFG-GO) Os gráficos abaixo mostram transformações a que foi submetido um gás ideal.

Analisando esses gráficos é correto afirmar-se que:

01) no gráfico (a) observam-se três transformações: uma isovolumétrica, de *A* para *B*, uma isobárica, de *B* para *C*, e uma isotérmica, de *C* para *D*.
02) o gráfico (b) representa uma transformação isobárica.
04) a área destacada no gráfico (c) representa o trabalho realizado pelo gás, para ir do estado *A* para o estado *B*.
08) se o gráfico (d) representar uma transformação isotérmica, a área destacada representará o calor recebido pelo gás, na transformação de *A* para *B*.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 182 (UFPE) Um mol de um gás ideal, inicialmente à temperatura de 300 K, é submetido ao processo termodinâmico $A \rightarrow B \rightarrow C$ mostrado no diagrama *V versus T*.

Determine o trabalho realizado pelo gás, em calorias (considere $R = 2{,}0$ cal/mol · K).

a) 1.200 cal
b) 1.300 cal
c) 1.400 cal
d) 1.500 cal
e) 1.600 cal

T. 183 (Olimpíada Brasileira de Física) Uma certa quantidade de gás ideal está dentro de um recipiente que contém um pistão móvel, conforme a figura a seguir. As paredes, inclusive a do pistão, são adiabáticas, com exceção de uma delas, que permite a troca de calor com uma fonte.

Fornecendo calor ao recipiente, podemos afirmar que:

a) a temperatura do gás irá sempre aumentar.
b) a temperatura do gás irá sempre diminuir.
c) a temperatura do gás manter-se-á constante se o trabalho realizado for nulo.
d) a temperatura do gás diminuirá se o trabalho realizado pelo gás for maior que o calor fornecido.
e) a temperatura do gás diminuirá se o pistão se deslocar para a esquerda.

T. 184 (UFSCar-SP) Uma pequena quantidade de um gás ideal é mantida hermeticamente fechada dentro de um cilindro rígido dotado de um êmbolo. Puxando-se rapidamente o êmbolo, verifica-se uma diminuição na temperatura do gás. Em relação à transformação sofrida por esse gás, é verdadeiro afirmar que:

a) o volume aumentou, num processo isobárico.
b) a pressão diminuiu, num processo isovolumétrico.
c) o volume aumentou, num processo isotérmico.
d) o volume aumentou proporcionalmente mais do que a pressão diminuiu.
e) a pressão diminuiu proporcionalmente mais do que o volume aumentou.

T. 185 (PUC-RS) Um cilindro de metal dotado de um êmbolo móvel, em cujo interior se encontra um gás em equilíbrio termodinâmico, é semelhante a uma bomba de encher pneus de bicicleta com a saída de ar bloqueada.

Ao fazer-se uma força sobre o êmbolo, resultando na compressão muito rápida do gás, o que caracteriza uma transformação adiabática,

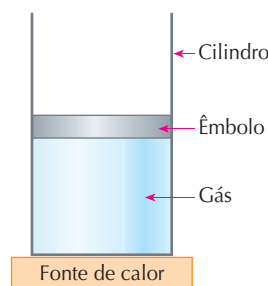
I. Ocorre um aumento na temperatura do gás.
II. O trabalho realizado pela força aumenta a energia interna do gás.
III. O trabalho realizado pela força é igual ao calor liberado para o meio externo.

Está(ão) correta(s) apenas:

a) I b) II c) III d) I e II e) I e III

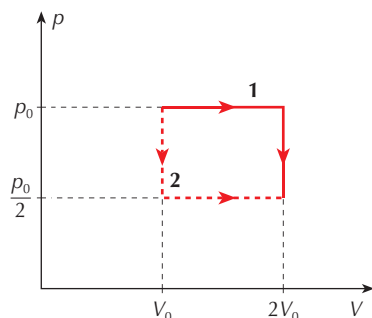
T. 186 (UFRN) José brincava com uma bomba manual de encher bola de futebol. Mantendo o orifício de saída de ar tampado com seu dedo, ele comprimiu rapidamente o êmbolo da bomba e observou que o ar dentro da bomba era aquecido. A explicação para esse fenômeno é:

a) Devido à rapidez da compressão, não há tempo para troca de calor entre o ar dentro da bomba e o meio externo; assim, o trabalho realizado sobre o ar dentro da bomba aumenta a sua energia interna.
b) A rapidez da compressão favorece a troca de calor entre o ar dentro da bomba e o meio externo; assim, o trabalho realizado sobre o ar dentro da bomba diminui a sua energia interna.
c) Em qualquer compressão de um gás, a temperatura do gás sempre aumenta.
d) Em qualquer transformação isovolumétrica, o trabalho realizado pelo gás é nulo.

T. 187 (Unifesp) A figura representa uma amostra de um gás, suposto ideal, contida dentro de um cilindro. As paredes laterais e o êmbolo são adiabáticos; a base é diatérmica e está apoiada em uma fonte de calor.

Considere duas situações:

I. o êmbolo pode mover-se livremente, permitindo que o gás se expanda à pressão constante;
II. o êmbolo é fixo, mantendo o gás a volume constante. Suponha que nas duas situações a mesma quantidade de calor é fornecida a esse gás, por meio dessa fonte. Pode-se afirmar que a temperatura desse gás vai aumentar:

a) igualmente em ambas as situações.
b) mais em I do que em II.
c) mais em II do que em I.
d) em I, mas se mantém constante em II.
e) em II, mas se mantém constante em I.

T. 188 (Vunesp) Dois gases idênticos são submetidos a processos reversíveis diferentes, como mostra o gráfico.

O gás 1 segue os processos indicados pela linha cheia do gráfico, e o gás 2, pela linha tracejada. Ambos partem do ponto (p_0, V_0) e terminam no ponto $\left(\frac{p_0}{2}, 2V_0\right)$ no diagrama p *versus* V.

É incorreto afirmar que:

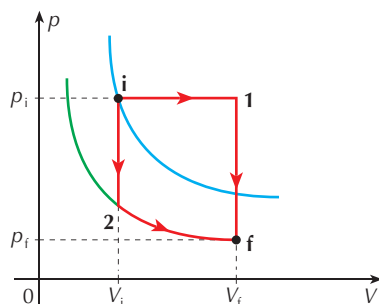
a) 1 recebeu mais calor que 2.

b) 2 realizou menos trabalho que 1.

c) a energia interna no ponto inicial é a mesma para os dois.

d) a energia interna de 1 é maior que a energia interna de 2 no ponto final.

e) 2 cedeu calor no primeiro trecho.

T. 189 (PUC-RS) Responder a essa questão analisando as afirmações com base no gráfico a seguir, o qual representa a pressão de um gás, que segue a equação de estado do gás ideal, em função do seu volume. No gráfico, os pontos i e *f* indicam, respectivamente, o estado inicial e final do gás, e as curvas representadas são as isotermas correspondentes às temperaturas T_i e T_f desses estados.

Os seguintes processos são descritos no gráfico:

- Processo 1 – Uma transformação isobárica seguida de uma transformação isovolumétrica.
- Processo 2 – Uma transformação isovolumétrica seguida de uma transformação isotérmica.

I. Comparando o trabalho W realizado pelo gás em cada processo, verifica-se que $W_1 > W_2$.

II. Comparando a troca de calor Q com o gás em cada processo, verifica-se que Q_1 , Q_2.

III. Comparando a variação da energia interna ΔU do gás em cada processo, verifica-se que $\Delta U_1 = \Delta U_2$.

Analisando as afirmativas, pode-se concluir que está(ão) correta(s):

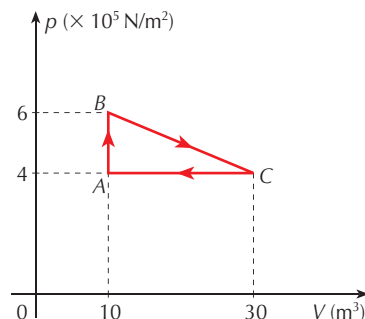
a) somente II.

b) somente III.

c) somente I e II.

d) somente I e III.

e) I, II e III.

T. 190 (UFBA) Uma certa massa de gás ideal sofre a transformação cíclica reversível *ABCA*, conforme o diagrama de pressão *versus* volume apresentado abaixo.

Nessas condições, é correto afirmar:

01) Ao passar do estado A para o estado B, há um acréscimo na temperatura do gás.

02) Ao passar do estado B para o estado C, a temperatura da massa gasosa se mantém constante.

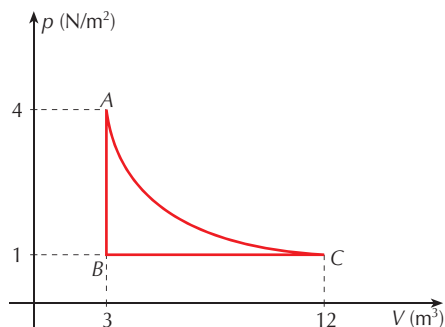
04) Ao passar do estado C para o estado A, a variação da energia interna do gás é igual a zero.

08) No ciclo a quantidade de calor trocada com o meio externo vale $2 \cdot 10^6$ J.

16) O trabalho realizado na expansão *BC* vale $2 \cdot 10^7$ J.

32) Na etapa *AB* há uma equivalência entre a variação da energia interna do gás e a quantidade de calor trocada com o meio externo.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 191 (PUC-MG) Uma amostra de gás ideal sofre as transformações mostradas no diagrama pressão *versus* volume ilustrado abaixo. Sabe-se que a linha AC é uma isoterma.

Observe-o bem e analise as afirmativas abaixo, apontando a opção correta:

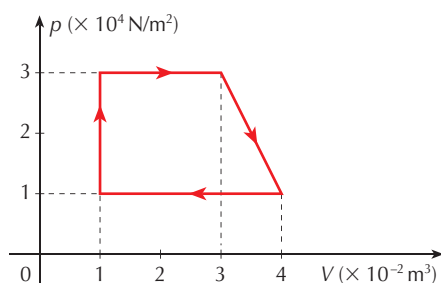
a) Na transformação $A \rightarrow B$ a temperatura da amostra aumenta.

b) O trabalho feito pelo gás do ciclo $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ é positivo.

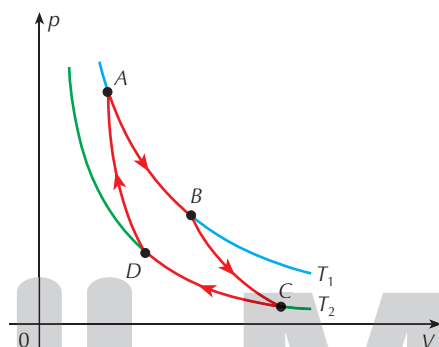
c) O trabalho realizado pelo gás na etapa $A \rightarrow B$ foi de 9 J.

d) No decorrer da transformação $C \rightarrow A$, quando a pressão for de 3 N/m², o volume será de 4,5 m³.

e) A energia interna da amostra diminui ao longo da transformação $A \rightarrow B$.

T. 192 (UCS-RS) Certa máquina térmica executa o ciclo da figura, efetuando 20 revoluções por segundo.

A potência da máquina, em quilowatts, é igual a:

a) 100
b) 10
c) 1,0
d) 0,5
e) 0,20

T. 193 (UFBA) A figura representa o ciclo de Carnot para um gás ideal.

Nessas condições, é correto afirmar:

01) Na compressão adiabática a energia interna do gás diminui.
02) Na expansão isotérmica o gás recebe calor de uma das fontes.
04) Na expansão adiabática a temperatura do gás diminui.
08) Na compressão isotérmica a energia interna do gás diminui.
16) Na transformação cíclica o gás atinge o equilíbrio térmico com a fonte quente, ao reiniciar novo ciclo.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

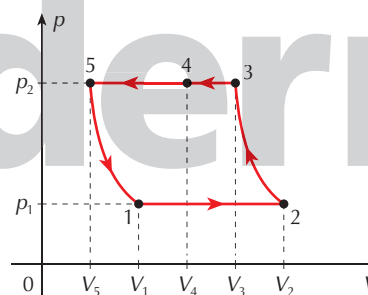
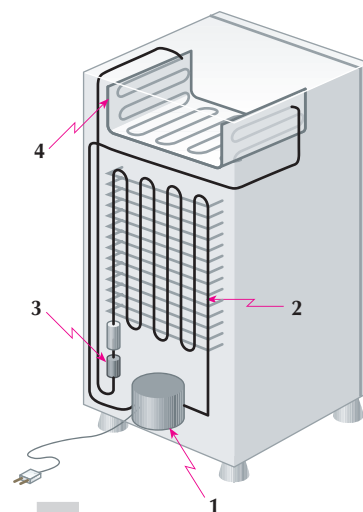
T. 194 (UFSCar-SP) "Inglaterra, século XVIII. Hargreaves patenteia sua máquina de fiar; Arkwright inventa a fiandeira hidráulica; James Watt introduz a importantíssima máquina a vapor. Tempos modernos!" (C. Alencar, L. C. Ramalho e M. V. T. Ribeiro, *História da Sociedade Brasileira*.)

As máquinas a vapor, sendo máquinas térmicas reais, operam em ciclos de acordo com a segunda lei da Termodinâmica. Sobre essas máquinas, considere as três afirmações seguintes.

I. Quando em funcionamento, rejeitam para a fonte fria parte do calor retirado da fonte quente.
II. No decorrer de um ciclo, a energia interna do vapor de água se mantém constante.
III. Transformam em trabalho todo calor recebido da fonte quente.

É correto o contido apenas em:

a) I
b) II
c) III
d) I e II
e) II e III

T. 195 (UEPB) O refrigerador é uma máquina térmica que retira calor dos corpos colocados em seu interior e rejeita calor para o meio ambiente, que está a uma temperatura mais elevada que a do seu interior. No refrigerador, entretanto, a transferência de calor não é espontânea: é oposta à "ordem natural" e, de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, é um processo que só se pode efetivar com fornecimento externo de energia. Como está esquematizado na figura abaixo, o refrigerador consta de quatro componentes: **1** – compressor; **2** – condensador ou radiador; **3** – válvula (tubo capilar); e **4** – congelador.

Tendo como base as informações dadas, analise, nas proposições a seguir, os processos que ocorrem em cada um dos componentes da geladeira, com suas respectivas transformações gasosas, como se observa no diagrama $p \times V$ apresentado, que representa as variações de pressão e volume para o ciclo da substância de operação na geladeira.

I. No compressor, devido à rapidez com que ocorre a compressão, esta pode ser considerada adiabática. A temperatura e a pressão se elevam. Como não há trocas de calor ($Q = 0$), o trabalho realizado pelo compressor é equivalente à variação da energia interna da substância ($2 \rightarrow 3$).
II. O condensador ou radiador é a serpentina na qual o vapor se liquefaz, trocando calor com o ambiente. Inicialmente ocorre um aumento de temperatura à pressão constante ($3 \rightarrow 4$), seguida de uma diminuição do volume da substância em condensação, à pressão e temperatura constantes ($4 \rightarrow 5$).
III. A válvula é um tubo capilar que diminui a pressão da substância. Esta descompressão ocorre com muita rapidez, não permitindo a troca de calor com o ambiente, logo se constitui numa transformação adiabática ($5 \rightarrow 1$).

IV. No congelador, a substância operante troca calor com o interior da geladeira, a pressão constante e diminuição de temperatura, expandindo-se à medida que se vaporiza (calor latente de vaporização) (1 ⟶ 2).

A partir da análise feita, assinale a alternativa correta.

a) Todas as proposições são verdadeiras.
b) Apenas as proposições III e IV são verdadeiras.
c) Apenas as proposições I e III são verdadeiras.
d) Apenas as proposições II e III são verdadeiras.
e) Apenas as proposições II e IV são verdadeiras.

T. 196 (UEL-PR) Uma das grandes contribuições para a ciência do século XIX foi a introdução, por Sadi Carnot, em 1824, de uma lei para o rendimento das máquinas térmicas, que veio a se transformar na lei que conhecemos hoje como Segunda Lei da Termodinâmica. Na sua versão original, a afirmação de Carnot era:

"Todas as máquinas térmicas reversíveis ideais, operando entre duas temperaturas, uma maior e outra menor, têm a mesma eficiência, e nenhuma máquina operando entre essas temperaturas pode ter eficiência maior do que uma máquina térmica reversível ideal."

Com base no texto e nos conhecimentos sobre o tema, é correto afirmar:

a) A afirmação, como formulada originalmente, vale somente para máquinas a vapor, que eram as únicas que existiam na época de Carnot.
b) A afirmação de Carnot introduziu a ideia de Ciclo de Carnot, que é o ciclo em que operam, ainda hoje, nossas máquinas térmicas.
c) A afirmação de Carnot sobre máquinas térmicas pode ser encarada como uma outra maneira de dizer que há limites para a possibilidade de aprimoramento técnico, sendo impossível obter uma máquina com rendimento maior do que a de uma máquina térmica ideal.
d) A afirmação de Carnot introduziu a ideia de Ciclo de Carnot, que veio a ser o ciclo em que operam, ainda hoje, nossos motores elétricos.
e) Carnot viveu em uma época em que o progresso técnico era muito lento, e sua afirmação é hoje desprovida de sentido, pois o progresso técnico é ilimitado.

T. 197 (UFMT) Um cientista afirma ter construído uma máquina térmica que trabalha entre as temperaturas $T_2 = 400$ K e $T_1 = 600$ K e que produz trabalho a uma taxa de 200 W. A quantidade de calor fornecida pela fonte quente à máquina a cada ciclo é $Q_1 = 100$ J e sua frequência de trabalho é 4 ciclos por segundo. Considere que o rendimento de uma máquina térmica é dado por $\frac{\mathcal{T}}{Q_1}$, sendo $\mathcal{T}$ o trabalho produzido pela máquina no ciclo, e que o rendimento máximo de uma máquina térmica $\left(\text{dado por } \eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$ ocorre quando a máquina opera segundo um ciclo de Carnot. Levando em conta as informações dadas, pode-se concluir que:

a) esse feito não poderia ter ocorrido, pois contraria a segunda lei da termodinâmica.
b) esse feito não poderia ter ocorrido, pois contraria a primeira e a segunda leis da termodinâmica.
c) esse feito não poderia ter ocorrido, pois contraria a primeira lei da termodinâmica.
d) essa máquina térmica poderia funcionar, pois não contraria as leis da termodinâmica.
e) essa máquina térmica poderia funcionar, pois não contraria o princípio de conservação de energia.

T. 198 (IME-RJ) Considere uma máquina térmica operando em um ciclo termodinâmico.
Essa máquina recebe 300 J de uma fonte quente cuja temperatura é de 400 K e produz um trabalho de 150 J. Ao mesmo tempo, rejeita 150 J para uma fonte fria que se encontra a 300 K. A análise termodinâmica da máquina térmica descrita revela que o ciclo proposto é um(a):

a) máquina frigorífica na qual tanto a Primeira Lei quanto a Segunda Lei da termodinâmica são violadas.
b) máquina frigorífica na qual a Primeira Lei é atendida, mas a Segunda Lei é violada.
c) motor térmico no qual tanto a Primeira Lei quanto a Segunda Lei da termodinâmica são atendidas.
d) motor térmico no qual a Primeira Lei é violada, mas a Segunda Lei é atendida.
e) motor térmico no qual a Primeira Lei é atendida, mas a Segunda Lei é violada.

T. 199 (PUC-MG) Um escritório de patentes recebe um pedido de um inventor que deseja registrar uma máquina térmica que opera entre duas fontes de calor com temperaturas de 227 °C e 177 °C. Segundo o inventor, a máquina retira $4{,}0 \cdot 10^5$ J de calor da fonte quente e realiza um trabalho útil $5{,}0 \cdot 10^4$ J em cada ciclo de funcionamento. Nessas condições, é correto afirmar que:

a) o pedido do inventor não pode ser aceito, pois a máquina, trabalhando entre essas temperaturas, não pode ter rendimento superior a 10%.
b) o rendimento dessa máquina é superado por uma máquina de Carnot que opere entre essas fontes.
c) o rendimento dessa máquina é igual ao de uma máquina de Carnot que opere entre essas duas fontes térmicas.
d) a única forma de se melhorar o rendimento da máquina é que o inventor utilize combustível de melhor qualidade.

T. 200 (UFC-CE) A eficiência de uma máquina de Carnot que opera entre a fonte de temperatura alta (T_1) e a fonte de temperatura baixa (T_2) é dada pela expressão $\eta = 1 - \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$, em que T_1 e T_2 são medidas na escala absoluta ou de Kelvin.
Suponha que você dispõe de uma máquina dessas com uma eficiência $\eta = 30\%$. Se você dobrar o valor da temperatura da fonte quente, a eficiência da máquina passará a ser igual a:

a) 40%
b) 45%
c) 50%
d) 60%
e) 65%

T. 201 (UFRN) As máquinas térmicas transformam a energia interna de um combustível em energia mecânica. De acordo com a 2ª Lei da Termodinâmica, não é possível construir uma máquina térmica que transforme toda a energia interna do combustível em trabalho, isto é, uma máquina de rendimento igual a 1 ou equivalente a 100%.

O cientista francês Sadi Carnot (1796-1832) provou que o rendimento máximo obtido por uma máquina térmica operando entre as temperaturas T_1 (fonte quente) e T_2 (fonte fria) é dado por $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Com base nessas informações, é correto afirmar que o rendimento da máquina térmica não pode ser igual a 1 porque, para isso, ela deveria operar:

a) entre duas fontes à mesma temperatura, $T_1 = T_2$, no zero absoluto.
b) entre uma fonte quente a uma temperatura, T_1, e uma fonte fria à temperatura $T_2 = 0$ °C.
c) entre duas fontes à mesma temperatura, $T_1 = T_2$, diferente do zero absoluto.
d) entre uma fonte quente a uma temperatura, T_1, e uma fonte fria à temperatura $T_2 = 0$ K.

T. 202 (UFV-MG) De acordo com a segunda lei da Termodinâmica, a entropia do Universo:

a) não pode ser criada nem destruída.
b) acabará transformada em energia.
c) tende a aumentar com o tempo.
d) tende a diminuir com o tempo.
e) permanece sempre constante.

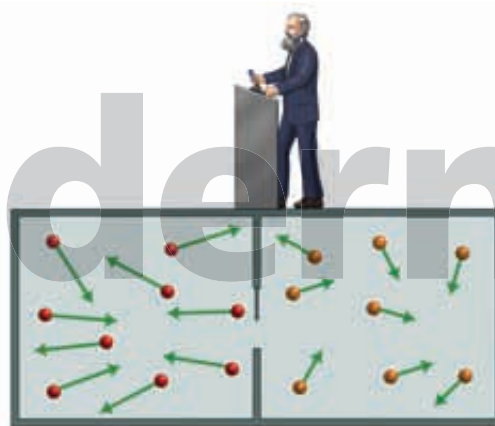
T. 203 (UFBA) Com base nos conhecimentos sobre Termodinâmica, é correto afirmar:

01) Quando um gás ideal é comprimido rapidamente, a energia interna do gás aumenta.
02) O ciclo de Carnot é composto por transformações isométricas e isobáricas.
04) O rendimento de uma máquina térmica depende exclusivamente da temperatura da fonte quente.
08) No refrigerador o gás refrigerante remove calor da fonte fria, evaporando-se, e transfere calor à fonte quente, condensando-se.
16) Admitindo-se o Universo como sistema físico isolado, a entropia do Universo sempre aumenta.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

T. 204 (Olimpíada Brasileira de Física) Uma lâmpada é embalada numa caixa fechada e isolada termicamente. Considere que no interior da lâmpada há vácuo e que o ar dentro da caixa seja um gás ideal. Em um certo instante, a lâmpada se quebra. Se desprezarmos o volume e a massa dos componentes da lâmpada (vidro, suporte, filamento, ...) e a variação de energia associada à sua quebra, é incorreto afirmar que:

a) a energia interna do gás permanecerá a mesma após a quebra da lâmpada.
b) a entropia do gás aumentará após a quebra da lâmpada.
c) a temperatura do gás permanecerá a mesma após a quebra da lâmpada.
d) a pressão do gás diminuirá após a quebra da lâmpada.
e) após a quebra da lâmpada, o gás realizará um trabalho positivo para se expandir e ocupar o volume onde anteriormente havia vácuo.

T. 205 (UFSCar-SP) Maxwell, notável físico escocês da segunda metade do século XIX, inconformado com a possibilidade da morte térmica do Universo, consequência inevitável da segunda lei da Termodinâmica, criou o "demônio de Maxwell", um ser hipotético capaz de violar essa lei. Essa fictícia criatura poderia selecionar as moléculas de um gás que transitassem entre dois compartimentos controlando a abertura que os divide, como ilustra a figura.

Por causa dessa manipulação diabólica, as moléculas mais velozes passariam para um compartimento, enquanto as mais lentas passariam para o outro. Se isso fosse possível:

a) esse sistema nunca entraria em equilíbrio térmico.
b) esse sistema estaria em equilíbrio térmico permanente.
c) o princípio da conservação da energia seria violado.
d) não haveria troca de calor entre os dois compartimentos.
e) haveria troca de calor, mas não haveria troca de energia.